This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Mesures Électriques.

Liége. — Imprimerie de THIER, boulevard de la Sauvenière, 10.

Mesures Électriques

LEÇONS

DONNÉES

A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

DE L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

PAR

Éric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

Étalons et instruments.
Essais mécaniques, photométriques, magnétiques et électriques.
Applications aux lignes, générateurs, moteurs et transformateurs.

TROISIÈME ÉDITION

REFONDUE ET COMPLÉTÉE

Avec 304 figures dans le texte

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR
Quai des Grands-Augustins, 55

1908

(Tous droits réservés.)

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
414620
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
R 1906 L

PRÉFACE.

Dans les Leçons sur l'Électricité [1], *que j'ai publiées précédemment, je n'ai introduit que des notions générales sur les mesures. Le présent ouvrage contient les développements du cours sur les essais électriques que je professe devant les élèves électriciens de l'Institut électrotechnique Montefiore. Ce sujet mérite une étude approfondie, car les mesures précises sont la base des progrès réalisés dans la construction des appareils électriques. Ces progrès ont été rapides, parce que les électriciens, formés dans les laboratoires, ont appliqué dès le début les procédés rigoureux d'investigation qui caractérisent les recherches physiques. Ce ne sera pas un de leurs moindres mérites d'avoir contribué à introduire dans la technique les essais fréquents et exacts.*

J'expose dans l'introduction les méthodes employées pour la discussion des expériences. Ces méthodes sont appliquées, dans le cours de l'ouvrage, à de nombreux exemples ; elles fixent le degré d'approximation des résultats et elles détournent les commençants

---

[1] *Leçons sur l'Électricité.* — *Paris, Gauthier-Villars.*

du travers trop fréquent d'exprimer ceux-ci par des nombres de chiffres qui ne sont nullement en rapport avec la précision des mesures qui les ont fournis. Étant donnée l'approximation que l'on cherche à obtenir, la discussion des méthodes d'essai indique la rigueur à apporter dans chacune des observations qui concourent au résultat et elle permet d'utiliser aussi bien que possible le temps dont on dispose pour les expériences, ce qui est d'une importance capitale dans les laboratoires industriels.

J'ai cru bon d'examiner aussi dans l'introduction les principales mesures géométriques, mécaniques et photométriques, appliquées couramment par les électriciens, afin de leur remémorer ces mesures dont les descriptions sont éparpillées dans des ouvrages spéciaux.

Les mesures électriques débutent par la description des étalons et l'exposé des méthodes générales convenant à la détermination des intensités de courant, des quantités d'électricité, des forces électromotrices, des capacités, des puissances électriques et des coefficients d'induction. Pour les essais précis, j'insiste sur l'emploi du galvanomètre Deprez-d'Arsonval et de ses dérivés, qui sont utilisés de plus en plus. J'ai cherché à éviter les calculs fastidieux auxquels se prêtent certains dispositifs d'expérience, tels que le pont de Wheatstone, pour me borner aux développements mathématiques d'une utilité réelle.

Les essais magnétiques sont traités avec l'ampleur que leur importance comporte. Depuis les travaux de MM. Hopkinson et Ewing, la perméabilité et l'hystérésis du fer employé dans la construction des machines électriques sont éprouvées avec autant de soin que la conductibilité du cuivre qui sert à la fabrication des bobines.

Après les procédés généraux de mesure viennent les applications

aux essais des galvanomètres, des câbles, des lignes télégraphiques, des réseaux électriques, des piles, des accumulateurs, des machines génératrices, des moteurs et des transformateurs. J'ai commencé par les applications dans lesquelles on n'utilise que des courants faibles et de basse tension, sans danger pour les élèves et les appareils. Ces premiers exemples, qui constituent d'excellents exercices, par lesquels les débutants s'habituent à traiter les problèmes avec la rigueur scientifique et à comparer les résultats fournis par les diverses méthodes, ont été multipliés à dessein. C'est après seulement que viennent les essais des générateurs, transformateurs et récepteurs de courants intenses, qui ont généralement un caractère plus industriel.

L'aspect de cette troisième édition suffit pour montrer qu'elle comporte des développements considérables par rapport aux précédentes.

Tout ce qui touche à l'électricité se perfectionne en effet avec une rapidité qui fait le bonheur des inventeurs, mais qui impose à l'enseignement un effort continu pour se maintenir à la hauteur de sa tâche.

Fidèle au désir de progrès qui m'a toujours préoccupé, j'ai remanié une grande partie des chapitres de cet ouvrage avec le souci d'y introduire les nouveautés importantes et de coordonner les méthodes pour en faciliter le souvenir.

C'est ainsi que les étalons et les appareils de mesure électriques et photométriques ont été revus pour tenir compte des travaux nombreux dont ils ont fait l'objet dans ces dernières années.

Le chapitre relatif au matériel des salles de recherches de précision, ainsi que des laboratoires industriels, a été remanié et mis à jour.

Les ampèremètres et voltmètres industriels ont été traités à part, avec les développements que comportent les instruments pour courants alternatifs et les particularités relatives aux étalonnages.

Dans les méthodes de mesure, je signalerai les dispositions nouvelles pour la vérification des résistances étalons, l'extension des propriétés du pont de Wheatstone aux courants variables et les combinaisons récentes pour la mesure des puissances.

Aux progrès relatifs aux compteurs s'ajoutent les méthodes de tarage et les principaux règlements concernant ces appareils.

Les méthodes de mesure des coefficients d'induction, de la perméabilité et de l'hystérésis ont fait l'objet de remaniements nombreux.

C'est la dernière partie de l'ouvrage, dans laquelle sont traitées les applications des mesures aux diverses branches de l'électrotechnique, qui a reçu les extensions les plus sérieuses, tant sous forme de méthodes nouvelles d'expérimentation, que de schémas d'installations.

Dans les essais des câbles, on trouvera de nombreuses additions touchant à la rigidité des diélectriques, aux épreuves d'isolement et aux recherches de dérangements dans les réseaux.

Le chapitre relatif aux générateurs et aux moteurs à courant continu a été développé spécialement en ce qui concerne les caractéristiques de fonctionnement, ainsi que les méthodes pour la séparation des pertes intérieures.

A propos des alternateurs et alternomoteurs, les méthodes d'enregistrement des courbes de ces appareils ont été revues, en même temps que des méthodes ont été indiquées pour analyser les harmoniques de ces courbes. La mesure des fréquences, le tracé des caractéristiques, la prédétermination de celles-ci et les méthodes de mesure du rendement ont fait l'objet de nouvelles études.

Un chapitre indépendant a été consacré aux moteurs asynchrones, afin de permettre l'examen détaillé des méthodes de mesure du glissement et des essais directs et indirects du rendement.

A la fin du volume ont été ajoutés aux tableaux antérieurs, un examen comparatif des règlements d'essais électriques adoptés dans les divers pays, ainsi que l'énumération des défauts pouvant se produire aux machines, avec les causes amenant ces dérangements.

Je remercie M. De Bast, sous-directeur à l'Institut électrotechnique Montefiore, qui m'a prêté son concours dans la correction des épreuves de cet ouvrage.

ÉRIC GERARD.

Mesures Électriques.

Dans les premières, on ramène la comparaison entre la grandeur inconnue et son étalon à la comparaison de deux grandeurs d'une autre espèce. Ainsi, dans la balance à ressort, le rapport de deux poids est réduit au rapport de deux longueurs. Dans les secondes, on identifie les effets de la grandeur cherchée avec ceux de l'étalon. Dans la balance à fléau, on équilibre le poids inconnu à l'aide de poids connus.

Les méthodes de déviation, qui sont ordinairement plus rapides, permettent de suivre la marche d'un phénomène ; c'est ainsi qu'un galvanomètre gradué indique les variations du courant qui le traverse. Par contre les appareils à déviation sont sujets à varier, par suite des altérations des ressorts ou des aimants qu'ils comportent. Ils peuvent être affectés par des causes perturbatrices extérieures, telles que des champs parasites. Si l'on ajoute que l'erreur de lecture est souvent importante, on comprendra que ces appareils procurent rarement une grande approximation.

Les méthodes de zéro sont généralement plus précises, parce qu'elles utilisent l'appareil de mesure dans les meilleures conditions de sensibilité et qu'elles permettent d'éliminer les causes d'erreur ci-dessus. Comme elles sont relativement lentes, on les réserve aux mesures de laboratoire, tandis que les méthodes de déviation s'appliquent aux essais courants.

Mesures directes. Erreurs systématiques et erreurs fortuites. — Les résultats d'essais présentent inévitablement des erreurs qui proviennent soit de la méthode employée, soit des instruments utilisés, soit de l'observateur même. Ces erreurs se divisent en deux classes.

La première comprend les erreurs, dites *constantes* ou *systématiques,* qui affectent le résultat dans un sens déterminé, toujours le même. Elles peuvent provenir d'un vice de méthode, d'une défectuosité d'appareil ou d'un défaut physique de l'observateur. Le déplacement du zéro d'un galvanomètre, la lenteur d'un observateur qui doit faire partir un chronomètre au moment où il voit ou entend un phénomène, amènent des erreurs systématiques.

On ne peut corriger ces erreurs qu'en variant les méthodes

d'observation, les instruments et les observateurs. La comparaison des divers résultats avec le résultat moyen permet d'estimer les erreurs systématiques. On peut souvent modifier les conditions d'expérience de manière qu'une erreur positive devienne négative, ce qui procure une moyenne exacte. Par exemple, le déplacement du zéro d'un galvanomètre augmente ou diminue la lecture faite sur la graduation suivant que le courant traverse l'instrument dans l'un ou l'autre sens.

Les changements tels que ceux qui sont dus à l'influence de la température sur la longueur ou sur la résistance électrique des corps, des variations du magnétisme terrestre sur les aimants, de la polarisation sur la force électromotrice d'une pile, doivent être regardés comme des erreurs systématiques, qu'on peut corriger lorsqu'on connaît l'importance et le mode d'action de ces causes.

Les erreurs de la seconde catégorie, dites *variables* ou *fortuites*, sont caractérisées par la propriété de fournir indifféremment des valeurs plus grandes ou des valeurs plus petites que le résultat vrai. Ainsi, lorsqu'un observateur mesure plusieurs fois une longueur de quelques mètres en employant un mètre étalon, il trouve généralement des nombres différents, qui peuvent s'écarter aussi bien en plus qu'en moins de la valeur exacte.

Lorsque toutes les observations ont comporté le même soin, la valeur la plus probable est fournie par la moyenne arithmétique des résultats. Cette moyenne élimine, autant que possible, les erreurs variables, mais elle reste affectée des erreurs constantes qui, dans l'exemple précédent, peuvent tenir à une courbure du mètre étalon, à un défaut de graduation de celui-ci, etc., et pour lesquelles des corrections séparées doivent être faites.

Il est important d'insister sur la nécessité d'apporter la même rigueur dans toutes les observations entrant dans la moyenne. Les débutants ont une tendance à se guider sur les premiers résultats obtenus et à rejeter ceux qui s'en écartent, de crainte d'arriver à des tableaux discordants. D'autres fois, les opérateurs ont une idée préconçue du résultat et éliminent

les observations qui s'en éloignent. S'il connaît le résultat auquel il doit arriver, l'observateur doit agir comme s'il l'ignorait et n'écarter que les résultats qui s'éloignent de la moyenne par suite d'une faute évidente. Les derniers résultats doivent être notés avec autant de soin que les premiers; ils ont plutôt plus de valeur puisque, dans le cours des expériences, l'observateur a pu se perfectionner.

Il est bon de s'habituer à estimer le dixième de la dernière division de l'instrument dont on se sert. Si même le fil de réticule ou l'index qui sert aux lectures est un peu grossier, il vaut mieux écrire la fraction estimée en dixièmes que sous la forme $^1/_2$, $^1/_4$, quitte à mentionner que l'erreur possible de lecture est 0,5 ou 0,25 d'une division. Avec un fil de réticule suffisamment fin, on arrive très bien à estimer le dixième d'une division correspondant à 1 mm. L'erreur maxima comporte alors 0,1 mm.

La moyenne des résultats a d'autant plus de chances de se rapprocher du résultat vrai inconnu que les nombres trouvés diffèrent moins entr'eux. On peut avoir un terme de comparaison à cet égard en considérant l'*erreur moyenne*, définie par la moyenne des différences entre le résultat moyen et les observations isolées, abstraction faite du signe de ces différences.

Ainsi, supposons que des mesures aient conduit aux nombres suivants :

NOMBRES	DIFFÉRENCES
167,95	+ 19
167,45	— 31
167,60	— 16
167,60	— 16
167,87	+ 11
167,88	+ 12
168,00	+ 24
167,85	+ 9
167,82	+ 6
167,60	— 16
Résultat moyen : 167,76	Différence moyenne : 16

Le résultat est 167,76 ± 0,16. Ce résultat doit éventuellement être corrigé des erreurs constantes connues. Si les erreurs systématiques ont varié pendant les observations, chaque résultat partiel doit être corrigé isolément, avant le calcul des moyennes.

Le nombre d'observations à adopter dépend des différences que celles-ci présentent entr'elles. Si les différences sont faibles, on conçoit qu'il est inutile de multiplier les mesures. Dans tous les cas, le calcul des probabilités enseigne que le crédit qu'on doit accorder au résultat moyen croît, non pas comme le nombre d'observations, mais comme la racine carrée de ce nombre, qui dépasse rarement 10.

L'*erreur relative moyenne* est le rapport de l'erreur moyenne au résultat moyen. Dans l'exemple précédent, cette erreur est 0,16/167,76, soit environ 0,001, c'est-à-dire 0,1 pour 100. Comme on le verra, c'est l'erreur relative moyenne qui sert généralement de base dans la discussion des méthodes d'essai.

Les erreurs fortuites suivent une loi qui a été découverte par Laplace et qui permet de calculer l'*erreur fortuite probable* du résultat moyen, celui-ci restant éventuellement entaché des erreurs systématiques inconnues. Dans les mesures électrotechniques, celles-ci sont souvent supérieures aux erreurs fortuites et peuvent difficilement être éliminées. Aussi est-il rarement utile, dans ces mesures, de faire les calculs compliqués qu'exige la détermination de l'erreur fortuite probable. L'indication de l'erreur moyenne suffit pour édifier sur la valeur des observations. Lorsque la précision des mesures comporte la détermination de l'erreur fortuite probable, on calcule celle-ci suivant les règles indiquées dans les traités spéciaux sur le calcul des probabilités.

Il y a un genre d'erreurs que nous avons laissé de côté. Ce sont les fautes grossières d'observation ou de calcul, la copie inexacte des résultats, etc. Souvent ces erreurs sont évidentes à la simple inspection des résultats ; on arrive à les éviter par le soin et l'ordre dans le travail.

Mesures indirectes. Erreur limite et erreur probable. — Lorsqu'un résultat est obtenu indirectement à l'aide de don-

nées expérimentales, il est important, aux points de vue de la discussion de la méthode et de la détermination des conditions d'essai les plus favorables, de fixer l'influence que présentent les erreurs moyennes commises dans les diverses observations sur l'exactitude du résultat final.

Quand, par exemple, l'intensité d'un courant est mesurée à l'aide de la déviation d'un galvanomètre, il est utile de vérifier quelle importance une erreur de lecture peut avoir sur la détermination de l'intensité. On arrive ainsi à définir dans quelle région de l'échelle l'influence de l'erreur de lecture est la plus faible. On peut trouver par l'expérience entre quelles limites il est possible de faire varier l'intensité du courant sans apporter de modification sensible à la déviation du galvanomètre ; mais il faudrait de longs tâtonnements pour déterminer dans quelle région de l'échelle l'erreur relative, due au défaut de sensibilité de l'appareil, est la plus petite. Le calcul permet de résoudre directement ce problème.

Il est non moins important d'estimer l'influence des erreurs partielles, afin de connaître les observations qu'il est utile de faire avec le plus de soin et celles dans lesquelles une erreur a peu de gravité. On arrive ainsi à utiliser de la meilleure manière possible le temps dont on dispose.

Le résultat des mesures indirectes est entaché des erreurs systématiques des observations qu'elles comportent. De plus, une erreur systématique peut encore provenir de ce que le résultat n'est pas lié aux données expérimentales par la fonction qu'on a admise. Ces erreurs constantes s'éliminent en variant les méthodes d'essai, les instruments et les modes d'observation, et en corrigeant les défauts connus.

Reste l'erreur du résultat due aux erreurs fortuites moyennes des diverses observations. Voici comment on l'estime.

Supposons que le résultat cherché y soit une fonction de diverses données d'observation x_1, x_2, ... x_n, sur lesquelles des erreurs δ_1, δ_2, ... δ_n peuvent être commises. Si ces erreurs sont assez faibles pour qu'il soit permis de négliger leurs carrés, on peut les supposer infinitésimales, les désigner par dx_1, dx_2, ... dx_n et déterminer l'erreur du résultat en appliquant les règles

du calcul différentiel, ce qui simplifie les opérations. Il faut toutefois se rappeler que, dans les applications usuelles, ce procédé n'est pas d'une rigueur mathématique absolue et ne donne que des résultats approchés.

Les erreurs partielles dx_1, dx_2, ... dx_n s'estiment en ayant égard à la précision des instruments qui ont servi à effectuer les diverses observations. Si chaque observation a été répétée un certain nombre de fois d'une manière indépendante, on prend pour dx_1, dx_2, ... dx_n les erreurs fortuites moyennes, calculées comme on l'a vu précédemment.

De la fonction

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_n) \qquad (1)$$

on tire, en appelant dy l'erreur totale du résultat,

$$\pm dy = \pm \frac{df}{dx_1} dx_1 \pm \frac{df}{dx_2} dx_2 \pm \ldots \pm \frac{df}{dx_n} dx_n. \qquad (2)$$

Les erreurs partielles du résultat dues aux erreurs des observations isolées sont exprimées en grandeur par

$$e_1 = \frac{df}{dx_1} dx_1, \quad e_2 = \frac{df}{dx_2} dx_2, \quad \ldots \quad e_n = \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Les signes des termes du second membre de (2) sont indéterminés. Pour connaître l'*erreur absolue limite* du résultat, on suppose que toutes les erreurs s'ajoutent :

$$E_1 = e_1 + e_2 + \ldots + e_n = \frac{df}{dx_1} dx_1 + \frac{df}{dx_2} dx_2 + \ldots + \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Dans le cas particulier où les expériences sont conduites de manière à rendre les erreurs partielles égales, on a

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_1}{n}.$$

L'*erreur relative limite* commise sur y est une fonction de la forme

$$\frac{E_1}{y} = \varphi(x_1, x_2, \ldots x_n). \qquad (3)$$

Lorsque la fonction y se réduit à un seul terme, on trouve

directement l'erreur relative limite en prenant le logarithme et en différentiant. Tel est le cas suivant.

L'intensité lumineuse d'une lampe électrique à incandescence est proportionnelle au cube du produit de la tension par le courant :

$$I = k\,(ei)^3.$$

De là on déduit

$$\text{Log}_{\text{nép.}}\, I = \text{Log}_{\text{nép.}}\, k + 3\,\text{Log}_{\text{nép.}}\, e + 3\,\text{Log}_{\text{nép.}}\, i.$$

Par différentiation on arrive immédiatement à

$$\frac{dI}{I} = \frac{3\,de}{e} + \frac{3\,di}{i}.$$

Dans cet exemple, si l'on s'impose l'égalité des erreurs relatives partielles, $3\,de/e = 3\,di/i$, on obtient pour l'erreur résultante

$$\frac{dI}{I} = 6\frac{de}{e} = 6\frac{di}{i},$$

c'est-à-dire que l'erreur relative limite du résultat est sextuple de l'erreur relative qu'entraîne la lecture de l'intensité du courant.

Au lieu de supposer que toutes les erreurs partielles s'ajoutent, ce qui est le cas le plus défavorable, on peut admettre que ces erreurs peuvent être aussi bien positives que négatives. Le calcul des probabilités montre qu'alors la valeur la plus probable de l'erreur, appelée l'*erreur absolue probable*, est

$$E_p = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \ldots + e_n^2}.$$

L'*erreur relative probable* est

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'(x_1, x_2, \ldots x_n). \qquad (4)$$

Si l'on désire l'égalité des erreurs partielles, on est conduit dans ces conditions à

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_p}{\sqrt{n}}.$$

Dans l'exemple précédent, on a, pour l'erreur relative probable,

$$3\sqrt{\left(\frac{de}{e}\right)^2+\left(\frac{di}{i}\right)^2}$$

et, quand les erreurs relatives partielles sont égales, $3\sqrt{2}$ fois l'erreur relative que comporte la mesure du courant.

Conditions les plus favorables d'une mesure indirecte. — Il arrive fréquemment qu'on peut modifier les conditions d'une mesure de manière à rendre minima l'erreur relative du résultat.

Cas d'une seule variable. Soit, par exemple, le cas de l'emploi d'un galvanomètre des tangentes shunté, qui donne l'intensité d'un courant par l'application de la formule

$$i = \mathrm{K}\ \mathrm{tang}\ \alpha,$$

K étant un facteur qu'on peut faire varier à volonté en modifiant le shunt utilisé.

On peut se poser le problème de déterminer la valeur de α qui rend minima l'erreur relative sur i.

L'erreur absolue di, due à une erreur $d\alpha$ commise dans la lecture de l'angle, est

$$di = \mathrm{K}\frac{d\alpha}{\cos^2\alpha}.$$

L'erreur $d\alpha$ correspond à 0,5, 0,25, . . . 0,1 de division de l'échelle suivant la finesse de l'aiguille indicatrice, l'écartement de ses traits limites et l'habileté de l'observateur.

L'erreur relative est

$$\frac{di}{i} = \frac{2\,d\alpha}{\sin 2\alpha} = \varphi(\alpha).$$

La condition du minimum de cette erreur s'obtient en posant

$$\frac{d\varphi(\alpha)}{d\alpha} = 0,$$

d'où l'on tire $\cos 2\alpha = 0$ ou $\alpha = 45^\circ$. On vérifie facilement que la dérivée seconde est positive pour $\alpha = 45^\circ$ et que, par

conséquent, on a bien affaire à un minimum. Dans beaucoup de cas, la seule inspection du résultat montre si l'on se trouve en présence d'un maximum ou d'un minimum.

Il est important de rechercher le minimum de l'erreur relative et non celui de l'erreur absolue du résultat. Dans l'exemple considéré, l'erreur absolue est minima pour $\alpha = 0$, valeur pour laquelle le galvanomètre présente le maximum de sensibilité ; mais alors l'erreur relative devient énorme.

Il n'est pas toujours possible de trouver des conditions d'expérience correspondant à un minimum de l'erreur. Avec le galvanomètre des tangentes sans shunt on ne peut pas modifier K de façon à obtenir, pour une valeur quelconque de i, une déviation α voisine de 45°.

Il arrive aussi que les méthodes ou les appareils dont on dispose ne permettent pas de se placer dans les meilleures conditions d'essai. Lorsqu'on mesure le courant débité par une dynamo, à l'aide d'un ampèremètre à divisions égales, le minimum de l'erreur relative correspond à la déviation maxima ; mais, si le courant fourni par la machine n'avance pas l'aiguille au delà des premières divisions de l'échelle et si l'on n'a pas d'autre appareil, il faut bien accepter l'erreur considérable qui en résulte. Dans ce cas, on a

$$i = \mathrm{K}\,\alpha,$$

d'où

$$\frac{di}{i} = \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Pour une erreur absolue $d\alpha$ donnée, l'erreur relative di/i diminue quand α croît ; mais α est lié aux valeurs déterminées de i et K. Il en est ainsi chaque fois que, dans la relation

$$i = f(\alpha),$$

les paramètres de α sont invariables, car une seule valeur est alors possible pour α avec un même courant.

Cas de plusieurs variables. Dans le cas de plusieurs variables, nous avons trouvé, pour l'erreur relative limite,

$$\frac{\mathrm{E}_1}{y} = \varphi(x_1, x_2, \ldots x_n)$$

et, pour l'erreur relative probable,

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'(x_1, x_2, \ldots x_n).$$

Le minimum de l'erreur relative limite est donné par

$$\frac{d\varphi}{dx_1} = 0, \quad \frac{d\varphi}{dx_2} = 0, \quad \ldots \quad \frac{d\varphi}{dx_n} = 0,$$

et le minimum de l'erreur relative probable par

$$\frac{d\varphi'}{dx_1} = 0, \quad \frac{d\varphi'}{dx_2} = 0, \quad \ldots \quad \frac{d\varphi'}{dx_n} = 0.$$

On distingue le minimum d'un maximum en examinant si les dérivées du second ordre sont positives, à moins que l'inspection des résultats ne rende le doute impossible.

Souvent on trouve la condition de minimum en appliquant des règles simples : quand la quantité à rendre minima est une somme de deux termes dont le produit est constant, sa plus petite valeur correspond à l'égalité des termes.

Ainsi qu'on l'a fait remarquer à propos des fonctions à une seule variable, il n'est pas toujours possible de réaliser la condition d'erreur minima, mais on doit chercher à s'en rapprocher.

En général, l'importance de l'erreur varie peu au voisinage du minimum, de sorte qu'il n'y a pas d'inconvénient, dans la plupart des cas, à s'écarter, dans une certaine mesure, des conditions théoriques les plus favorables.

C'est la raison pour laquelle on détermine fréquemment les meilleures circonstances d'expérience en cherchant à rendre minima non l'erreur relative probable, dont l'expression affecte souvent une forme compliquée, se prêtant difficilement au calcul, mais bien l'erreur relative limite, qui est ordinairement beaucoup plus simple.

Considérons le cas fréquent de deux variables :

$$y = f(x_1, x_2).$$

Deux solutions se présentent.

1). On peut chercher le rapport x_1/x_2 qui rend minima l'erreur relative du résultat. La connaissance de ce rapport est suffisante lorsque les conditions d'expérience fixent la meilleure valeur à donner à l'une des variables. Le problème se réduit alors à la recherche du minimum d'une fonction à une seule variable.

2). Si l'on veut déterminer les valeurs de x_1 et de x_2 considérés comme variables indépendantes, on dérive la fonction y successivement par rapport à x_1 et à x_2, et l'on égale les dérivées à o.

Une application fera mieux comprendre ce qui précède.

Dans plusieurs mesures que nous étudierons dans le cours de cet ouvrage, la grandeur numérique c d'une quantité est obtenue en fonction de celle c' de son étalon par deux déviations galvanométriques α et α' telles que

$$c = c' \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On peut se demander quel est le rapport de α à α' rendant minima : *a*) l'erreur relative limite commise sur c, *b*) l'erreur relative probable faite sur la même quantité.

a). Prenons d'abord l'erreur relative limite. On a, pour les erreurs partielles,

$$\frac{dc}{d\alpha} d\alpha = - \frac{c' \alpha'}{(\alpha - \alpha')^2} d\alpha,$$

$$\frac{dc}{d\alpha'} d\alpha' = \frac{c' \alpha}{(\alpha - \alpha')^2} d\alpha';$$

d'où, en admettant que les erreurs de lecture $d\alpha$ et $d\alpha'$ sont égales et donnent des erreurs partielles qui s'ajoutent,

$$E_1 = \frac{c' (\alpha + \alpha')}{(\alpha - \alpha')^2} d\alpha$$

et

$$\frac{E_1}{c} = \frac{\alpha + \alpha'}{\alpha' (\alpha - \alpha')} d\alpha.$$

Posons

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = n;$$

il vient

$$\frac{E_l}{c} = \frac{n(n+1)}{(n-1)} \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

En considérant α comme seule variable, le minimum de l'erreur relative limite correspond à

$$n = 2{,}415.$$

b). Le carré de l'erreur probable du résultat est, pour $d\alpha = d\alpha'$,

$$E_p^2 = \frac{c'^2(\alpha^2 + \alpha'^2)}{(\alpha - \alpha')^4} d\alpha^2$$

et le carré de l'erreur relative probable

$$\frac{E_p^2}{c^2} = \frac{(\alpha^2 + \alpha'^2)}{\alpha'^2(\alpha - \alpha')^2} d\alpha^2 = \frac{(n^2+1)n^2}{(n-1)^2} \frac{d\alpha^2}{\alpha^2}.$$

Le minimum de l'erreur relative probable satisfait à

$$n^3 - 2n^2 - 1 = 0.$$

On trouve approximativement $n = 2{,}2$, résultat très peu différent de celui auquel conduit la considération de l'erreur limite.

Rapport à établir entre les erreurs partielles d'un résultat indirect. — Il est à remarquer que, si un résultat comporte plusieurs mesures et si quelques-unes de celles-ci admettent une approximation plus grande que les autres, il est superflu de chercher à obtenir, pour les données partielles, une exactitude très supérieure à celle que permet d'atteindre l'observation la moins exacte. Cependant, pour que les erreurs partielles aient toutes la même influence, il peut arriver qu'il soit nécessaire de faire quelques observations avec plus d'exactitude que d'autres. On a vu que, dans l'évaluation du rendement lumineux d'une lampe à incandescence, la mesure

du voltage doit se faire avec une précision sextuple de celle que comporte l'intensité lumineuse.

Voici un autre exemple. La résistivité d'un conducteur électrique de longueur l, de diamètre δ et de résistance r est donnée par la formule

$$\rho = \frac{\pi \delta^2}{4} r \frac{1}{l}.$$

On trouve l'erreur relative limite en prenant la différentielle du logarithme de cette fonction et en supposant que les erreurs partielles s'ajoutent

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2\frac{d\delta}{\delta} + \frac{dr}{r} + \frac{dl}{l}.$$

On voit que, si l'erreur partielle commise dans l'estimation du diamètre doit être égale à celle due à la mesure de la longueur, la première évaluation doit être faite avec une approximation double de celle que comporte la seconde. On doit donc apporter plus d'exactitude dans la détermination du diamètre, qui est précisément la plus difficile. Si l'on ne peut mesurer le diamètre à moins de 1 pour 100 près à l'aide de la jauge dont on dispose, il est inutile d'obtenir une exactitude supérieure dans l'estimation de la longueur, puisque le complément de temps et de soin que demande cette approximation plus grande n'augmente la précision du résultat final que d'une quantité insignifiante.

Si, dans l'exemple précédent, on considère l'erreur relative probable, on obtient

$$\frac{E_p^2}{\rho^2} = 4\frac{d\delta^2}{\delta^2} + \frac{dr^2}{r^2} + \frac{dl^2}{l^2}. \qquad (1)$$

Quand on exige que les erreurs relatives partielles soient égales, il vient

$$\frac{2\,d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{E_p}{\rho\sqrt{3}}.$$

En s'imposant l'erreur relative probable admissible dans le résultat, l'équation (1) permet de fixer les erreurs relatives

partielles des diverses observations. Si, dans l'hypothèse de l'égalité de celles-ci, l'erreur relative probable sur la résistivité doit être de 0,1 pour 100 au plus, on a

$$\frac{E_p}{\rho} = 0{,}001 ;$$

d'où

$$\frac{2\,d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{0{,}001}{\sqrt{3}} = 0{,}000\,58,$$

soit 0,058 pour 100. Partant, la mesure du diamètre doit alors être faite avec une approximation de 0,029 pour 100.

Il peut être avantageux de s'imposer une condition autre que l'égalité des erreurs partielles. C'est le cas lorsqu'il est possible d'accroître l'exactitude de certaines observations avec une faible dépense de temps. Il vaut mieux alors, étant donnée l'erreur permise sur le résultat, diminuer les erreurs partielles dues à ces observations, de manière à pouvoir tolérer des erreurs partielles plus grandes dans les autres.

Il va sans dire que, si l'on désire le résultat le plus exact possible, il faut tâcher de diminuer toutes les erreurs partielles, sans cependant perdre son temps à rechercher des approximations mal équilibrées. Ainsi, dans la détermination de l'effet utile d'une machine à vapeur, il est inutile de mesurer la longueur de la course du piston à 0,01 pour 100 près, si une erreur de 1 pour 100 peut être commise dans l'évaluation de la vitesse.

Si l'on admet l'égalité des erreurs partielles, on peut mettre en évidence quelques conséquences intéressantes :

1). L'erreur relative limite d'une *somme* est égale à l'erreur relative de chacune des parties.

Soit

$$a = b + c.$$

On a

$$\frac{da}{a} = \frac{db + dc}{b + c}.$$

Donc, lorsque $db/b = dc/c$,

$$\frac{da}{a} = \frac{db}{b} = \frac{dc}{c}.$$

Si les erreurs partielles diffèrent, l'erreur sur la somme est au plus égale à la plus forte.

2). L'erreur relative limite d'une *différence* est supérieure à l'erreur relative de chacun des termes, d'autant plus que ceux-ci sont plus voisins de l'égalité.

De

$$a = b - c,$$

on déduit l'erreur relative limite

$$\frac{da}{a} = \frac{db + dc}{b - c}.$$

Or

$$\frac{db}{b} = \frac{dc}{c} = \frac{db - dc}{b - c}.$$

Par suite,

$$\frac{da}{a} = \frac{db - dc + 2\,dc}{b - c} = \frac{db}{b} + \frac{2\,dc}{b - c}.$$

3). L'erreur relative limite du *produit* ou du *quotient* de deux quantités est égale au double de l'erreur relative commise sur chacune de celles-ci.

A

$$a = bc \quad \text{et} \quad a = \frac{b}{c}$$

correspond l'erreur relative limite

$$\frac{da}{a} = \frac{db}{b} + \frac{dc}{c}.$$

4). L'erreur relative de la *puissance* n^e d'une quantité est égale à n fois l'erreur relative commise sur celle-ci.

5). L'erreur relative de la *racine* n^e d'une quantité est égale à la n^e partie de l'erreur relative que comporte cette dernière.

Ces résultats montrent que, dans le choix des méthodes de mesure, on doit chercher à éviter celles qui donnent la valeur désirée sous forme d'une puissance élevée, d'un produit d'un grand nombre de facteurs ou d'une différence minime.

En s'habituant à discuter les méthodes d'essai, on finit par acquérir le sens pratique qui permet de distinguer rapidement les erreurs partielles négligeables et les corrections, relatives à l'effet de la température, de la pression, etc., qu'on peut laisser de côté. On évite ainsi l'obstacle sur lequel se buttent les personnes qui accordent une importance exagérée à certaines corrections se prêtant à des développements de calcul pour lesquels elles se sentent des aptitudes spéciales, et qui omettent des circonstances physiques ou s'appuient sur des hypothèses susceptibles d'apporter des erreurs très supérieures aux précédentes.

Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives. Règles à calcul. — Connaissant l'erreur moyenne relative d'un résultat direct ou l'erreur probable relative d'un résultat indirect, on peut apprécier le nombre de chiffres significatifs admissibles dans l'expression de ce résultat. Par chiffres significatifs il faut entendre ceux qui n'ont pas simplement pour objet de déterminer la position de la virgule indicatrice des unités. On pousse les calculs jusqu'à un chiffre de plus que ne le comporte l'exactitude des essais, de manière que le dernier chiffre significatif soit seul incertain. Ainsi, pour une erreur relative de 0,1 pour 100, le résultat ne doit pas comporter plus de 4 chiffres significatifs, bien que certaines opérations numériques effectuées pour calculer ce résultat puissent en fournir beaucoup plus. Si, par exemple, une division avait donné pour quotient 19369973, il faudrait écrire, en forçant le dernier chiffre, 19370000 ou plus simplement 1937×10^4.

Voici quelques-unes des approximations qu'on peut atteindre dans les mesures électriques.

Les valeurs absolues de l'ohm, du volt et du coulomb sont connues à 0,1 pour 100 près. Les étalons à mercure de l'ohm peuvent être reproduits à 0,002 pour 100 près; les étalons

métalliques de la même grandeur sont réalisés à 0,01 pour 100 près; les résistances des boîtes usuelles sont des copies exactes à 0,2 pour 100 près. Les condensateurs isolés au mica sont étalonnés à 0,2 pour 100 près. La détermination électrolytique de l'intensité d'un courant peut atteindre l'approximation de 0,05 pour 100. L'évaluation des forces électromotrices au moyen de l'étalon Clark permet une approximation de 0,1 pour 100. Le coefficient de self-induction des bobines sans fer peut s'estimer à 0,3 pour 100 près; mais, avec les bobines à noyau en fer, l'erreur peut atteindre 3 à 4 pour 100. L'emploi des ampèremètres et des voltmètres usuels entraîne des erreurs généralement supérieures à 0,5 pour 100.

On voit que les essais de résistance sont les mesures électriques qui permettent la plus grande approximation. C'est pourquoi l'on cherche en général à ramener ces mesures à la comparaison de deux résistances.

Dans les mesures industrielles qui cumulent les erreurs du voltmètre et de l'ampèremètre, on ne dépasse ordinairement pas l'exactitude du centième. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'utiliser la *règle à calcul* pour les opérations numériques effectuées sur les résultats des mesures industrielles (1). Cet instrument, dans les mains d'une personne exercée, abrège les opérations, évite les erreurs grossières et épargne beaucoup de peine. Il a l'avantage de conserver sensiblement la même approximation à tous les calculs effectués sur une même échelle. Se prêtant au calcul des résultats au fur et à mesure que s'effectuent les observations, il permet, en cas d'erreur, de recommencer celles-ci pendant que l'expérience est encore montée. Pour les mesures industrielles, la règle de 26 cm, qui donne 0,3 pour 100 d'approximation, suffit. Pour les calculs plus précis, on peut utiliser la règle de 52 cm ou la règle héliçoïdale de Fuller; celle-ci procure une approximation de 0,02 pour 100. Ces utiles appareils constituent un outillage qui devrait se trouver sur la table de tous

(1) Sella et Montefiore; *Théorie et pratique de la règle à calcul.* — Baudry, Paris.

les ingénieurs, de même que les formulaires donnant les tableaux des carrés des nombres, des cubes, etc.

Si l'on doit pousser plus loin l'approximation des opérations numériques sur des résultats réunis en tableau, on fait le premier calcul avec l'exactitude voulue et l'on pratique ensuite à la règle les opérations sur les différences entre le premier résultat et les suivants. Quand ces différences sont faibles, on conserve facilement l'approximation désirée. Par exemple, pour multiplier les nombres du tableau de la page 4 par 15 en vue d'obtenir des produits exacts à 0,1 pour 100 près, on multiplie la valeur moyenne 167,76 de manière à conserver quatre chiffres et l'on fait à la règle les multiplications par 15 des différences de la colonne de droite, afin de voir dans quelle mesure varie le 4e chiffre dans les autres produits.

Interpolation. — Il arrive fréquemment qu'on ne peut pas réaliser les conditions physiques requises pour amener l'index d'un appareil de mesure dans une position déterminée. Par exemple, il se peut qu'on ne parvienne pas à graduer le courant qui traverse un galvanomètre de manière à arrêter l'aiguille sur une division δ donnée de l'échelle, mais qu'on connaisse deux intensités voisines i_1 et i_2 pour lesquelles l'aiguille occupe des positions δ_1 et δ_2 situées de part et d'autre de la position requise. Les valeurs des courants étant peu différentes, on est alors en droit d'admettre, si ce n'est pas la règle, que les déviations sont proportionnelles aux intensités dans les limites observées. Une simple proportion fournit donc la valeur du courant inconnu i :

$$\frac{\delta_2 - \delta_1}{i_2 - i_1} = \frac{\delta - \delta_1}{i - i_1},$$

de sorte que

$$i = i_1 + \frac{(\delta - \delta_1)(i_2 - i_1)}{\delta_2 - \delta_1}.$$

Cela revient à supposer que la courbe $i = f(\delta)$ se confond avec une droite entre les abscisses δ_1 et δ_2.

On ne peut extrapoler en dehors des limites d'observation,

en adoptant le procédé ci-dessus, qu'à la condition de s'écarter très peu de ces limites.

Préparation d'un essai. Notes d'expérience. Rapports. Représentation graphique des résultats. — On ne doit exécuter un essai qu'après avoir étudié consciencieusement la méthode à employer et discuté, au préalable, les meilleures conditions d'expérience.

La méthode étant connue et un schéma bien net de l'installation ayant été tracé, on procède au placement des appareils d'essai en adoptant le plus grand ordre dans la disposition de ceux-ci. En ce qui concerne les connexions électriques, on ne saurait apporter trop de soin dans l'arrangement des fils, ni de propreté dans les contacts des conducteurs, des fiches et des clefs de circuit. Des négligences sous ce rapport entraînent souvent de longues recherches de dérangements. On évitera de tordre les fils de liaison sous forme de boudins, qui accroissent inutilement la résistance et la self-induction des circuits.

Il faut se persuader que la préparation des expériences constitue la partie la plus difficile et souvent la plus longue d'un essai.

L'expérimentateur relève dans un carnet de notes toutes les observations au fur et à mesure que celles-ci sont effectuées. Les notes doivent être assez nettes pour qu'une personne au courant de la méthode d'essai puisse les comprendre. En vue de mieux ordonner les résultats, on dresse des tableaux à colonnes contenant les nombres similaires.

On enregistre soigneusement les circonstances de l'essai, en commençant par la date et l'heure, les numéros des appareils employés, la température de l'air ambiant et les autres conditions physiques. Pour avoir négligé de noter la température, on ne peut faire les corrections, souvent très importantes, que l'effet de celle-ci entraîne.

Les calculs conduisant aux résultats et la discussion de ces derniers sont établis de manière à permettre la révision aisée de la suite des opérations.

Après l'essai, on dresse un rapport ou compte-rendu de celui-ci. Le rapport rappelle la théorie de la méthode employée,

donne une courte description des appareils utilisés, s'ils n'ont pas été décrits déjà dans un rapport précédent, énumère toutes les données d'expérience et reproduit bien nettement les calculs numériques à l'aide des signes spéciaux; les résultats y sont mis en évidence sous forme de tableaux bien ordonnés.

Lorsque les résultats fournissent les variations d'une grandeur en fonction d'une autre grandeur indépendante, par exemple les variations de la résistance d'un conducteur en fonction de sa température ou celles de la force électromotrice d'une dynamo en fonction du courant débité, il est utile de représenter graphiquement ces variations en se servant de papier quadrillé. On adopte, autant que possible, pour le rapport un format capable de contenir les feuilles de diagrammes non pliées. Le format du papier ministre est généralement suffisant. Après avoir choisi des échelles de coordonnées convenables, on porte les valeurs de la variable indépendante en abscisses et les résultats correspondants en ordonnées. Les points ainsi définis sont précisés par l'intersection des deux branches de petites croix ou par les centres de petits cercles. On trace alors, à la main ou au pistolet, la courbe moyenne qui satisfait le mieux aux points trouvés. On peut se servir dans le même but d'une règle flexible d'acier à bord garni de plomb, qu'on courbe suivant la ligne médiane.

L'échelle des ordonnées peut différer de l'échelle des abscisses pour éviter des courbes qui s'étendent trop en longueur ou en hauteur. Il peut aussi être utile de commencer à noter les ordonnées ou les abscisses à partir d'une valeur différente de o, ce qui correspond à un simple transport des axes de coordonnées.

Il est parfois nécessaire de déterminer l'ordonnée moyenne d'un diagramme. A cet effet, on planimètre l'aire comprise entre la courbe et des parallèles aux axes de coordonnées. Un moyen rapide, quand on n'a pas de planimètre à sa disposition et qu'une approximation de 5 pour 100 suffit, consiste à dessiner le diagramme sur du papier fort et régulier, à découper la figure à surfacer, pour la peser, et à comparer le poids à celui d'un carré connu tracé sur le même papier.

Les représentations graphiques offrent de nombreux avantages. Elles permettent d'embrasser d'un coup d'œil l'ensemble des résultats, de juger de la concordance ou de la divergence des observations et d'interpoler des résultats intermédiaires; en outre, elles font juger, par analogie, de la forme de la fonction algébrique qui a le plus de chance de représenter la loi empirique du phénomène.

Si le diagramme est une droite ou s'en rapproche sensiblement, la fonction cherchée est évidemment

$$y = a + bx.$$

Comme l'on a, d'après la formule de Mac Laurin,

$$y = f(x) = f(o) + \frac{x}{1} f'(o) + \frac{x^2}{1.2} f''(o) + \ldots,$$

la fonction inconnue peut, en général, se mettre sous la forme

$$y = a + bx + cx^2 + \ldots,$$

si les coefficients décroissent rapidement.

On peut employer cette formule parabolique, réduite à trois termes, lorsqu'à une partie de courbe sensiblement rectiligne succèdent des ordonnées croissant plus rapidement que les abscisses.

Si l'on a affaire à une courbe dont la première partie est sensiblement rectiligne et dont les ordonnées croissent ensuite de moins en moins rapidement, de manière à tendre vers une asymptote parallèle à l'axe des abscisses, on essayera la fonction hyperbolique

$$y = \frac{ax}{1 + bx}.$$

C'est le cas de la courbe empirique du magnétisme de Frölich.

Quand les ordonnées du diagramme croissent ou décroissent rapidement, il y a lieu de tenter une fonction exponentielle telle que

$$y = ae^{bx}$$

ou

$$y = a e^{-bx}.$$

Enfin, avec des ordonnées périodiquement positives et négatives, on trouvera la solution dans la série de Fourier

$$y = a \sin bx + a' \sin b'x + \ldots,$$

qui, dans beaucoup de cas, peut être réduite à un terme.

Les valeurs les plus probables des paramètres de ces fonctions se déterminent par l'application de la méthode des moindres carrés.

Il est prudent de ne pas attribuer une portée théorique à une fonction ainsi déduite empiriquement, parce qu'on serait conduit à des extrapolations erronées. Une extrapolation semblable a fait attribuer une limite nulle à la perméabilité du fer.

Unités de mesure. — *Unités fondamentales.* On ramène toutes les actions électriques et magnétiques à des forces et on les exprime par suite à l'aide des trois grandeurs primordiales : la longueur, la masse et le temps.

Les électriciens ont choisi pour mesurer ces grandeurs le *centimètre*, le *gramme* et la *seconde*.

Le centimètre est approximativement la billionième partie du quadrant terrestre ; rigoureusement, il est la centième partie du mètre étalon conservé à l'Établissement international de Sèvres. La mesure d'un arc de méridien, faite par Delambre et Borda, entraîna pour le mètre étalon une erreur probable de 0,187 mm.

Le gramme représente environ la masse d'un centimètre cube d'eau distillée au maximum de densité. Un étalon du kilogramme existe également à Sèvres. On estime qu'il dépasse de 1/25 000 la masse du dcm^3 d'eau.

Des copies des étalons déposés à Sèvres sont obtenues avec une exactitude remarquable. L'approximation est de 2 à 3 dix-millièmes de millimètre pour le mètre et de 1 centième de milligramme pour le kilogramme.

La seconde est la 86 400^{me} partie du jour solaire moyen.

Ces unités, dites fondamentales, sont représentées par les symboles [L], [M], [T].

Elles n'ont pas une permanence absolue. Le mètre et le kilogramme subissent des altérations lentes, comme tous les corps solides; la seconde varie par suite de l'amortissement que le frottement des marées détermine dans la révolution du globe. Mais les différences qui peuvent être dues à ces causes échappent jusqu'à présent à nos moyens d'investigation.

Unités dérivées. Pour exprimer les diverses grandeurs physiques, on pourrait choisir des unités arbitraires et indépendantes les unes des autres. Cette méthode, suivie pendant longtemps, ne présente pas d'inconvénient quand les mesures sont directes. Mais le plus souvent on évalue les quantités au moyen d'unités d'espèces différentes, en se servant des méthodes indirectes ou absolues.

Par exemple, pour mesurer une surface, on ne la compare pas directement à un étalon de surface, mais on détermine ses éléments linéaires, à l'aide de l'unité de longueur, et l'on applique la relation existant entre la surface et ses dimensions. Pour un carré s, de côté c, la relation est

$$s = k c^2.$$

Si $c = 1$, $s = k$. Le facteur arbitraire k, qui représente la surface du carré ayant l'unité de côté, peut être égalé à 1. L'unité de surface ainsi déterminée est le carré dont les côtés sont égaux à un centimètre ; elle est liée à l'une des unités fondamentales et s'appelle, pour cette raison, unité dérivée de surface.

De même, l'unité dérivée de volume est le cube ayant un centimètre de côté.

On peut ainsi définir des unités dérivées pour toutes les grandeurs physiques, en débarrassant de leurs coefficients arbitraires les relations qui unissent ces grandeurs entr'elles.

Le *système d'unités* déterminé par ce procédé se désigne par les initiales des unités fondamentales choisies. Le système C. G. S. d'unités, adopté par les électriciens, a pour base le centimètre, le gramme et la seconde.

Unités mécaniques dérivées. En poursuivant le procédé de raisonnement appliqué ci-dessus, on voit sans peine que l'unité de vitesse est la vitesse d'un mobile qui parcourt l'unité de longueur en l'unité de temps ; cette unité dérivée est la vitesse d'un centimètre par seconde.

L'unité de vitesse angulaire correspond à l'unité d'angle (arc égal au rayon) ou *radian* parcouru en l'unité de temps.

L'unité d'accélération est l'accélération pour laquelle la vitesse s'accroît d'une unité par seconde.

L'unité de quantité de mouvement est la quantité de mouvement de l'unité de masse se déplaçant avec l'unité de vitesse.

L'unité de force, qui a reçu le nom de *dyne*, est la force qui, appliquée à l'unité de masse, lui imprime l'unité d'accélération. L'unité usuelle de force est le *poids du gramme*, c'est-à-dire la force capable, sous notre latitude, d'imprimer à l'unité de masse une accélération approximativement égale à 981. Le gramme équivaut par conséquent à 981 dynes.

L'unité de travail, appelée *erg*, est le travail accompli par l'unité de force suivant l'unité de longueur dans sa propre direction. L'unité usuelle de travail est le kilogrammètre, qui vaut 981×10^5 ergs. La calorie (gramme-degré) correspond à $4{,}18 \times 10^7$ ergs.

L'unité de puissance ou *erg par seconde* est la puissance d'un moteur développant l'unité de travail en l'unité de temps. Les unités usuelles de puissance sont le cheval-vapeur, qui représente $75 \times 981 \times 10^5 = 736 \times 10^7$ ergs par seconde, et le poncelet, défini par le Congrès de Mécanique de 1889 comme équivalant à 100 kilogrammètres par seconde, soit 981×10^7 ergs par seconde.

L'unité de densité est la densité d'un corps qui contient l'unité de masse dans l'unité de volume.

L'unité de module d'élasticité est le module d'un corps qui, supportant l'unité de force par unité de section, prend un allongement égal à sa longueur primitive.

Unités C. G. S. magnétiques et électriques. L'existence de l'action magnétique du courant électrique permet d'établir un système d'unités dans lequel toutes les grandeurs électriques et magnétiques sont définies en fonction d'un pôle.

Suivant la loi de Coulomb, l'unité de pôle magnétique est le pôle qui repousse un pôle égal situé à la distance d'un centimètre avec la force d'une dyne.

Les autres grandeurs magnétiques se mesurent à l'aide d'unités dérivées, définies par leurs relations avec l'unité de pôle rappelées ci-après (1) :

Potentiel magnétique	$\mathfrak{V} = \Sigma m/r$
Intensité de champ	$\mathfrak{H} = -d\mathfrak{V}/dl$
Moment magnétique.	$\mathfrak{A} = l \Sigma m$
Intensité d'aimantation	$\mathfrak{I} = \mathfrak{A}/v$
Densité superficielle	$\sigma = m/s$
Puissance d'un feuillet	$\mathfrak{P} = \sigma \varepsilon$
Flux de force magnétique	$\mathfrak{N} = m \omega$
Coefficient d'induction	$\mathfrak{M} = \mathfrak{N}/\mathfrak{P}$
Coefficient d'aimantation ou de susceptibilité. .	$\varkappa = \mathfrak{I}/\mathfrak{H}$
Coefficient de perméabilité	$\mu = 1 + 4\pi\varkappa$

L'effet magnétique d'un courant est identique à celui d'un feuillet de même contour et de puissance égale à l'intensité du courant. Un courant circulaire d'intensité i, de longueur l et de rayon r, par exemple, développe sur l'unité de pôle placée au centre une force

$$\mathfrak{H} = \frac{l\,i}{r^2}.$$

On déduit de cette relation que l'unité d'intensité est l'intensité d'un courant circulaire de rayon unité produisant, par unité de longueur, l'unité de force sur l'unité de pôle placée au centre de l'arc.

L'unité de quantité d'électricité se tire de la relation

$$q = i\,t.$$

C'est la quantité transportée par l'unité de courant en l'unité de temps.

---

(1) Eric Gerard ; *Leçons sur l'Électricité.* — Gauthier-Villars, Paris.

La résistance électrique est liée à l'intensité du courant par la loi de Joule

$$W = i^2 r t.$$

L'unité de résistance est, par suite, la résistance d'un conducteur dans lequel l'unité d'intensité développe l'unité de chaleur en l'unité de temps.

Le potentiel électrique, qui sert de mesure à la force électromotrice, trouve dans la loi d'Ohm une relation avec l'intensité et la résistance :

$$V - V' = e = ir.$$

L'unité de force électromotrice ou de différence de potentiel produit l'unité de courant dans un conducteur ayant l'unité de résistance.

La capacité d'un conducteur s'exprime, en fonction de la charge et du potentiel, par la formule

$$c = \frac{q}{V}.$$

L'unité de capacité est représentée par la capacité d'un corps qui contient l'unité de charge sous l'unité de potentiel.

Unités pratiques. Les unités C. G. S. électriques sont figurées par des quantités qui diffèrent beaucoup, en général, des grandeurs qu'on rencontre dans les applications. Ainsi, la résistance électrique de 100 m de fil de fer de 4 mm de diamètre équivaut environ à un milliard d'unités de résistance. Afin de n'être pas obligé d'employer des nombres très forts ou très faibles pour exprimer les grandeurs usuelles, on a adopté des unités pratiques, représentées par des multiples des unités C. G. S. C'est pour une raison semblable que l'unité de longueur du système métrique, définie par la Convention Nationale, est, non pas le quadrant terrestre, mais sa $1/10^{7\text{ me}}$ partie.

L'unité pratique de résistance, qui a reçu le nom d'*ohm*, est égale à 10^9 unités C. G. S. de résistance. Elle est représentée par un étalon constitué au moyen d'une colonne de

mercure d'un millimètre carré de section. Des expériences poursuivies jusqu'en 1884 ont établi que la longueur de la colonne correspondant à la résistance d'un ohm est, à la température de 0° C, voisine de 106 cm, ce qui a fait proposer cette longueur pour la définition de l'*ohm légal*, faisant foi dans les transactions commerciales. Toutefois, cette proposition n'a pas rencontré la sanction des États. Comme, d'ailleurs, des expériences plus précises, exécutées depuis 1884, ont montré que l'*ohm vrai* est représenté, avec une approximation de 1/5000, par la résistance, à la température de la glace fondante, d'une colonne mercurielle de 14,4521 grammes, d'une section transversale constante et d'une longueur de 106,3 cm, cette dernière définition a été agréée, par le Congrès de Chicago en 1893, sous le nom d'*ohm international*. On a spécifié un poids de mercure, au lieu d'indiquer la section de la colonne, pour éviter la différence, du reste extrêmement faible, entre la masse d'un dcm^3 d'eau à 0°C et le kilogramme.

L'unité pratique d'intensité, appelée *ampère*, est égale au dixième de l'unité C. G. S. Le Congrès de Chicago avait admis qu'un courant de cette intensité dépose, en une seconde, 1,118 mmg d'argent et 0,3287 mmg de cuivre, en décomposant un sel de ces métaux. Cette décision n'a pas été acceptée définitivement. Des expériences sont en cours, à la suite d'une Conférence tenue à Berlin en 1905, en vue d'arrêter le poids d'argent à adopter. Certains résultats semblent montrer que le nombre 1,118 est trop faible de près de 0,1 pour 100.

En appliquant les relations connues entre les grandeurs électriques, on déduit des deux unités précédentes les autres unités du système pratique.

L'unité pratique dérivée de force électromotrice, appelée *volt*, est la force électromotrice qui, appliquée à un conducteur dont la résistance vaut un ohm international, produit un courant égal à un ampère. On avait admis en 1893 que le volt est figuré, avec une exactitude suffisante pour les besoins de la pratique, par les $1000/1434^{mes}$ de la force électromotrice à 15° C de l'élément Clark, mais la correction citée ci-dessus pour l'ampère tendrait à imposer la fraction 1000/1433.

L'unité pratique de quantité ou *coulomb* est égale au dixième de l'unité C. G. S.

L'unité pratique de capacité, le *farad*, est la capacité d'un conducteur chargé d'un coulomb au potentiel d'un volt.

L'unité pratique de travail ou d'énergie électrique, correspondant à un volt-coulomb, s'appelle *joule :*

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kilogrammètre.}$$

L'unité pratique de puissance électrique, qui représente le volt-ampère, a reçu le nom de *watt*. Le kilowatt vaut 1,36 cheval-vapeur. L'emploi de cette unité est recommandé pour désigner la puissance des machines motrices, concurremment avec le poncelet, lequel équivaut à 100 kilogrammètres par seconde ou 0,981 kilowatt.

Il est à remarquer que les unités pratiques pourraient se déduire directement des équations entre les grandeurs électriques à la condition de choisir comme unités fondamentales, au lieu du centimètre et du gramme, 10^9 centimètres, soit environ la longueur du quadrant terrestre, et 10^{-11} gramme, la seconde étant conservée pour unité de temps.

Les coefficients d'induction étant homogènes à une longueur seront exprimés en centimètres dans le système C. G. S. et en billions de centimètres dans le système pratique. Les Américains ont adopté pour l'unité pratique de coefficient d'induction le nom de *henry*, qui a été sanctionné par le Congrès de Chicago. Auparavant, cette unité était appelée, en Europe, *secohm* ou *quadrant*. Elle est égale au coefficient d'induction d'un circuit dans lequel une variation du courant inducteur au taux de 1 ampère par seconde induit une force électromotrice de 1 volt.

Le tableau suivant réunit les noms adoptés pour les unités magnétiques et électriques, y compris les dénominations de gauss et maxwell admises par le Congrès de 1900 pour les unités C. G. S. d'intensité de champ et de flux magnétique.

Le système d'unités adopté par les électriciens a donné lieu à diverses critiques.

GRANDEURS	SYMBOLES	NOMS PROPOSÉS PAR LE CONGRÈS DE 1900	UNITÉS PRATIQUES	
			NOMS	VALEURS EN UNITÉS C. G. S.
Intensité de pôle	m	—	—	—
Moment magnétique	$\mathfrak{M}$	—	—	—
Intensité d'aimantation	$\mathfrak{I}$	—	—	—
Intensité de champ	$\mathfrak{H}$	*Gauss*	—	—
Flux magnétique	$\mathfrak{N}$	*Maxwell*	—	—
Induction magnétique	$\mathfrak{B}$	—	—	—
Perméabilité	μ	—	—	—
Susceptibilité	$\varkappa$	—	—	—
Reluctance	$\mathfrak{R}$	—	—	—
Résistance	R, r	—	Ohm	10^9
Conductance	—	—	Mho	10^{-9}
Force électromotrice	E, e	—	Volt	10^8
Différence de potentiel	V, v	—	Volt	10^8
Intensité de courant	I, i	—	Ampère	10^{-1}
Quantité d'électricité	Q, q	—	Coulomb	10^{-1}
			Ampère-heure	360
Capacité	C, c	—	Farad	10^{-9}
Énergie	W	—	Joule	10^7
			Watt-heure	36×10^9
Puissance	P	—	Watt	10^7
Résistivité	ρ	—	Ohm-centimètre	10^9
Conductibilité	γ	—	—	10^{-9}
Inductance	$\mathfrak{L}, \mathfrak{M}$	—	Henry	10^9
Force magnétisante	$\mathfrak{H}$	—	—	—
Force magnétomotrice	$\mathfrak{F}$	—	—	—

Heaviside a fait observer que la définition de l'unité de pôle magnétique acceptée a l'inconvénient de ne pas tenir compte de la perméabilité du milieu et qu'elle conduit au facteur 4π incommode dans les calculs. Pour éviter ce dernier, il a proposé un système d'unités, dit *rationnel*, dans lequel le pôle unité est celui qui repousse un pôle égal placé à 1 cm avec une force de 4π dynes. Ce système a lui-même le défaut d'introduire le facteur incommensurable 4π dans le rapport entre les nouvelles unités et les anciennes. M. Fessenden a remarqué que, si l'on considère la perméabilité de l'éther comme égale à 4π au lieu de l'unité, on évite ce facteur, sauf pour deux des unités. En supposant la perméabilité de l'éther égale à $4\pi \times 10^{-7}$ et en partant des unités fondamentales mètre, kilogramme et seconde, M. Giorgi arrive directement aux unités pratiques.

Quels que soient les mérites de ces propositions, il ne faut pas perdre de vue qu'il a fallu des années pour faire admettre les unités électriques actuelles par les praticiens et que des lois les ont consacrées dans divers pays. De nouvelles unités, de nouveaux noms seront donc difficilement sanctionnés par l'usage.

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN. (1)

Longueur et diamètre des conducteurs cylindriques. Micromètres. Jauge Palmer. Jauge à cadran. — L'évaluation de la résistivité des conducteurs amène à déterminer leur longueur et leur diamètre. Lorsque ces conducteurs sont formés de fils cordés, il convient de mesurer séparément l'un des brins du câble.

Si la longueur considérée est de l'ordre du mètre, on se sert d'un mètre étalon divisé en millimètres, le long duquel on tend le conducteur, après avoir tracé deux repères sur celui-ci. A l'œil nu, on juge de la longueur à moins d'un millimètre près. Avec une loupe, on peut apprécier la longueur avec une exactitude qui varie du $^1/_{5\,000}$ au $^1/_{10\,000}$ suivant l'habileté de l'observateur. La correction pour la température est négligeable dans une mesure de ce genre. Il est néanmoins désirable d'utiliser des mètres en invar, alliage découvert par M. Guillaume, contenant 53 % de fer et 47 % de nickel, et dont le coefficient de dilatation est pratiquement nul à la température ordinaire.

(1) MONTPELLIER et ALIAMET; *Guide pratique des mesures et essais industriels*. T. 1. — Dunod, Paris.

La mesure du diamètre s'effectue le plus souvent à l'aide d'un micromètre, tel que la *jauge Palmer*. L'appareil comprend un étrier E E', fig. 1, dont une des branches est traversée par une vis butoir *b* et l'autre par une vis micrométrique *v* présentant un pas qui correspond généralement à 0,5 mm. La tête de cette dernière vis porte un manchon M qui entoure l'écrou E'. Le conducteur est serré entre les deux vis. L'écartement de celles-ci se lit sur une graduation rectiligne indiquant le nombre de tours entiers de la vis micrométrique. Les fractions de tour

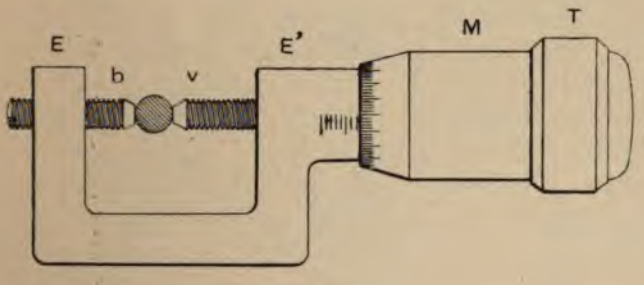


Fig. 1.

se mesurent au moyen de la graduation circulaire tracée sur la base du manchon M et divisée ordinairement en 50 parties. Lorsque la vis mobile touche le butoir, il faut que le zéro de la graduation circulaire corresponde exactement au zéro de la graduation rectiligne. Le réglage se fait par la vis *b*. Afin de ne pas déformer le fil par la pression, on n'agit pas directement sur le manchon M, mais on tourne ce dernier à l'aide d'une tête T qui glisse à frottement doux sur le manchon.

Pour la mesure des fils minces, on utilise une *jauge à cadran*. Le fil est placé entre un butoir d'agate fixe *b*, fig. 2, et un butoir semblable *b'* porté par un levier *l* pivotant autour d'un point O. Ce levier porte un secteur denté *s*, qui engrène avec un pignon *p* fixé sur l'axe d'un autre secteur *s'*. Ce dernier fait tourner un pignon *p'* qui entraîne une aiguille se déplaçant devant un cadran dont 100 divisions correspondent généralement à 1 mm d'écartement des butoirs. La pression du butoir *b'* sur le fil est très légère ; elle est donnée par un secteur *s''* qui

engrène avec le pignon p' et dont l'axe est sollicité par un ressort spiral S.

Les fils ayant une section très variable par suite de l'usure et de la déformation de la filière, il est nécessaire, pour obtenir le diamètre moyen, de comparer les épaisseurs dans une même section et de mesurer les variations de la grosseur dans des sections équidistantes.

Lorsqu'on connaît le poids spécifique δ du métal, le mode

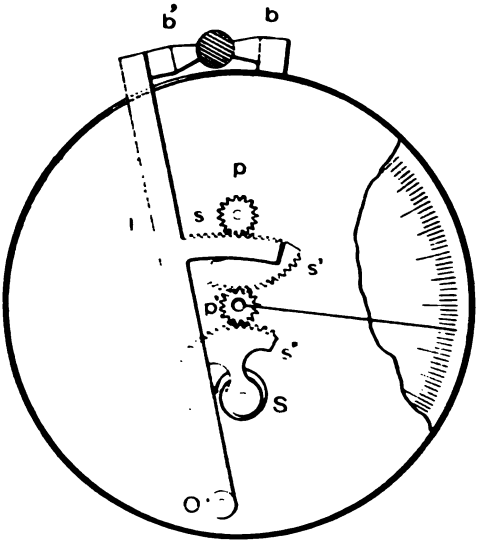


FIG. 2.

de détermination le plus exact du diamètre moyen d consiste dans la pesée d'une longueur connue l de fil. On a

$$d = \sqrt{\frac{4p}{\pi l \delta}},$$

p étant le poids trouvé. Le poids spécifique s'obtient en pesant le corps dans l'air, puis dans l'eau après avoir eu soin d'expulser par ébullition les bulles de gaz adhérentes.

Mesure des angles. Lecture directe. Lecture par réflexion. Méthode subjective et méthode objective. — L'une

des mesures les plus fréquentes que l'électricien ait à effectuer est celle des angles, qui peut se ramener à la comparaison de deux longueurs, celle de l'arc et celle du rayon. L'unité d'angle est le *radian*, pour lequel l'arc est égal au rayon. Elle correspond, en degrés de la circonférence, à

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ\ 17'\ 44''.$$

S'il s'agit de lire l'angle compris entre deux positions d'une aiguille aimantée portée par un pivot ou suspendue à un fil flexible, la méthode la plus simple consiste à fixer à l'aiguille un index effilé, qui se déplace devant un cercle divisé en degrés dont le centre est sur la verticale passant par le point d'attache de la tige aimantée. Afin d'éviter l'erreur de parallaxe, on place un miroir dans le plan de la graduation et l'on dispose l'œil de manière que l'index se confonde avec son image dans la glace. La lecture se fait ainsi dans un plan normal à la graduation. Ce mode direct de lecture ne permet pas une grande précision lorsque les angles sont faibles, à cause de la petite longueur des aiguilles indicatrices.

Pour apprécier les petits angles, on adopte les *lectures par réflexion*. On fixe à la pièce mobile un miroir et l'on détermine l'angle que fait un faisceau lumineux projeté sur le miroir avec le rayon réfléchi. Cet angle est précisément double de celui dont le miroir et, par suite, la pièce mobile ont tourné. On obtient de la sorte un faisceau indicateur auquel on peut donner une longueur de plusieurs mètres.

Il y a deux manières distinctes d'effectuer les lectures par réflexion. La première, due à Poggendorff et à Gauss, peut s'appeler méthode subjective. La seconde, imaginée par Lord Kelvin, est la méthode objective.

Méthode subjective. On fixe au système mobile un miroir plan passant par l'axe de rotation ou situé légèrement en avant de celui-ci. La fixation se fait à l'aide de quelques gouttelettes d'une solution de caoutchouc dans la benzine, ou mieux par trois griffes qui soutiennent les bords du miroir. Ce dernier moyen évite la déformation qui peut résulter, avec les glaces minces, de la dessication de la colle.

Devant le miroir se place une lunette à réticules croisés, supportée par un trépied à vis calantes et portant une échelle

Fig. 3.

horizontale, fig. 3. Celle-ci se dispose, à une distance de 1 à 3 mètres du miroir, normalement à l'axe optique de la lunette, laquelle est elle-même orientée de manière que le plan vertical

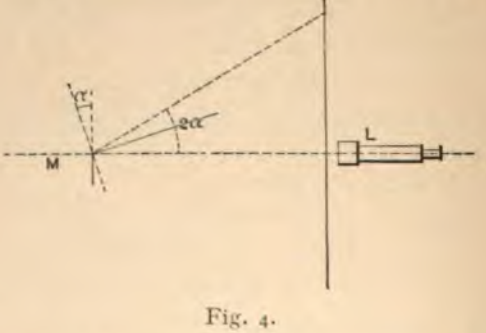


Fig. 4.

contenant son axe optique soit perpendiculaire au miroir dans sa position de repos et passe par son centre, fig. 4.

On met le support de la lunette de niveau au moyen des vis calantes et l'on règle la position de l'oculaire, ainsi que l'inclinaison de la lunette, jusqu'à ce qu'on voie dans le miroir l'image du zéro de l'échelle. Il faut que le rayon incident qui tombe sur le miroir soit normal à l'échelle. On s'en assure en tournant l'échelle de 90°: le miroir doit alors se trouver dans la direction de l'échelle. On vérifie aussi si, en déplaçant angulairement le miroir de quantités égales de part et d'autre de la position d'équilibre, on lit des écarts égaux sur la graduation.

Les chiffres indiquant les divisions sont doublement renversés afin de permettre l'emploi d'une lunette à deux lentilles. Au lieu de se trouver au milieu de l'échelle, le zéro de la graduation correspond parfois à l'une des extrémités. Dans le premier cas, les divisions de part et d'autre du zéro sont distinguées par des colorations différentes, rouge d'un côté, noire de l'autre. Il est souvent difficile d'assurer un bon éclairage de l'échelle. Les échelles tracées sur papier blanc doivent, le jour, être placées en face d'une fenêtre et, le soir, être éclairées par une rampe à gaz ou par des lampes à incandescence. Les jets de gaz seront disposés au-dessus du rayon visuel pour que le mouvement de l'air chaud ne gêne pas les lectures. Lorsqu'on emploie des lampes à incandescence, il convient de vérifier éventuellement si le courant qui les traverse n'influence pas le galvanomètre voisin. On doit à MM. Siemens et Halske des lampes à incandescence à long filament droit qui conviennent spécialement pour l'éclairage des échelles. Dans certains cas, celles-ci sont en verre dépoli et éclairées par transparence.

Il résulte des dispositions décrites ci-dessus que, pour un angle de déviation α de l'aiguille, on lit dans la lunette une longueur δ telle que

$$\operatorname{tang} 2\alpha = \frac{\delta}{l},$$

l étant la distance du miroir à l'échelle. On déduit de là

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arc\,tang} \frac{\delta}{l} = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{l} - \frac{1}{3}\frac{\delta^3}{l^3} + \frac{1}{5}\frac{\delta^5}{l^5} \dots\right).$$

Si les angles sont inférieurs à 3°, il suffit de retenir

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\delta}{l} - \frac{1}{6}\frac{\delta^3}{l^3}.$$

On peut éviter ce calcul en adoptant une échelle courbée en arc de cercle de rayon l. On a alors rigoureusement, en appelant θ la longueur lue sur la graduation,

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\theta}{l}.$$

La méthode subjective est très précise, mais elle est fatigante pour la vue. Dans les essais industriels on lui préfère la méthode objective.

Méthode objective. Pour appliquer cette méthode, on remplace le miroir plan par un miroir concave ou, ce qui donne des images plus nettes, par une lentille plan-convexe dont la face plane est argentée. A la lunette on substitue une lampe placée derrière l'échelle et envoyant un pinceau de lumière sur le miroir à travers une ouverture percée sous le milieu de l'échelle, fig. 5. Celle-ci est fixée à une distance et dans une position telles que l'image de la flamme vienne se former au milieu de la graduation. On trouve rapidement l'emplacement convenable de l'échelle en déplaçant devant celle-ci une feuille

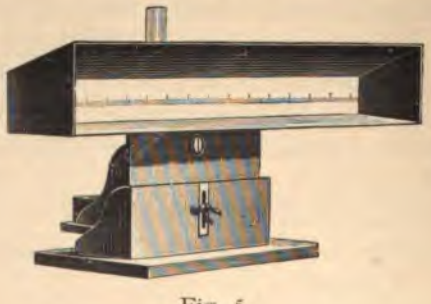


Fig. 5.

de papier sur laquelle se projette la tache lumineuse. On vérifie si l'échelle est bien orientée en appliquant contre elle une équerre dont le sommet coïncide avec le zéro de la graduation et dont le côté libre doit être dans la direction du miroir.

On peut au besoin utiliser un miroir plan, en concentrant les rayons à l'aide d'une lentille convergente interposée sur le parcours du faisceau incident.

Les lectures se font dans un demi-jour, afin de distinguer nettement l'image. Celle-ci a la forme d'un trait lumineux si l'orifice qui livre passage au faisceau est une fente verticale. On note alors les divisions limitées par l'un des bords de l'image. Il est préférable de recourir à une ouverture circulaire ou carrée traversée par un fil vertical. On obtient ainsi une image coupée par l'ombre du fil.

Fig. 6.

La fig. 6 montre diverses lampes employées dans une lanterne de MM. Hartmann et Braun. La première est une lampe électrique à incandescence à filament droit ; la deuxième un bec Auer à gaz et la troisième une lampe à mèche.

Avec une échelle opaque l'opérateur doit se tenir penché entre celle-ci et l'appareil pour faire les lectures. Une amélioration notable consiste à tracer la graduation sur une échelle

translucide, en toile à calquer par exemple. Dans ce cas l'image est très nette pour un observateur placé, derrière l'échelle, sur le prolongement du faisceau réfléchi. Les lampes à flamme utilisées avec ces échelles se placent dans une lanterne sur le côté et leur lumière est dirigée sur le système mobile par un miroir incliné placé derrière le milieu de la graduation, fig. 7.

Lorsque, les appareils de mesure étant peu influençables par les courants voisins, il est possible d'employer comme source lumineuse une lampe électrique à incandescence disposée derrière l'échelle, le réticule est inutile. La partie rectiligne du filament donne sur la graduation une image très nette,

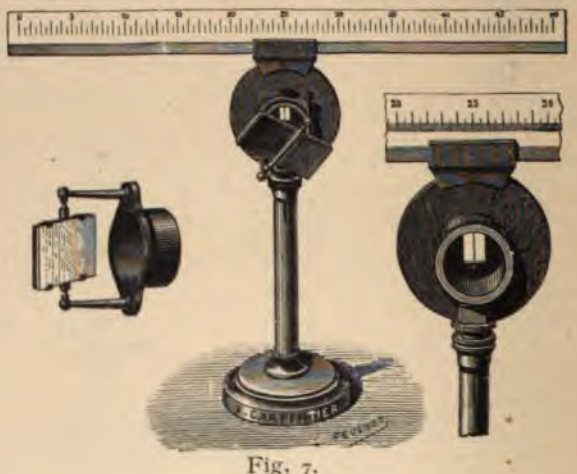


Fig. 7.

visible, dans une salle éclairée par la lumière diffuse du jour, lorsque l'observateur a soin de tourner le dos aux fenêtres ou de placer l'échelle perpendiculairement à celles-ci.

Si l'on veut que l'image allongée du filament vertical soit transformée en un point très brillant, pour les enregistrements photographiques par exemple, on intercale, comme l'a conseillé M. Boys, sur le trajet du rayon réfléchi, une lentille cylindrique dont l'axe est horizontal et qui permet la libre déviation de la lumière dans le sens de la graduation.

Avec une échelle droite, distante de 130 cm de l'instrument de mesure et dont la graduation s'étend jusqu'à 25 cm de part

et d'autre du zéro, l'erreur de proportionnalité maxima commise en substituant la tangente à l'angle n'atteint pas 1 pour 100. L'erreur est nulle si l'on courbe l'échelle suivant un arc de cercle dont le miroir occupe le centre.

La disposition suivante, due à MM. Siemens et Halske, permet de réduire notablement l'espace horizontal occupé par les appareils, ceux-ci pouvant être superposés le long d'un mur. La lanterne et l'échelle sont placées au-dessous de l'instrument dont les déviations doivent être observées. Une

Fig. 8.

lampe à incandescence à filament droit, enfermée dans la lanterne, émet, par un prisme à réflexion totale, un faisceau lumineux vertical qui est réfléchi, à l'aide d'un prisme semblable, sur le miroir mobile. Le faisceau renvoyé par ce dernier repasse dans le second prisme et tombe sur une échelle translucide inclinée à 45°.

Mesure des forces faibles. Divers modes de suspension des équipages mobiles. — Dans les appareils de mesure on doit souvent équilibrer des forces électriques ou magnétiques de faible intensité. On adopte dans ce but soit la réaction d'un champ magnétique sur un aimant, soit l'action de la pesanteur, soit la torsion élastique d'un fil ou d'un ressort de suspension.

Dans un galvanomètre à aimant mobile c'est le champ

magnétique terrestre qui fait équilibre à la force électromagnétique du courant. Si l'action terrestre est trop faible, on peut y ajouter celle d'un aimant directeur fixe, placé dans le voisinage de l'aiguille mobile de manière à exercer un couple venant en aide au couple terrestre. Au contraire, on réduit la force antagoniste en orientant l'aimant directeur de telle sorte que l'action terrestre soit neutralisée en tout ou en partie.

On a un exemple de l'emploi de la pesanteur comme force antagoniste lorsque l'attraction de deux bobines plates, parallèles et horizontales, traversées par des courants de même

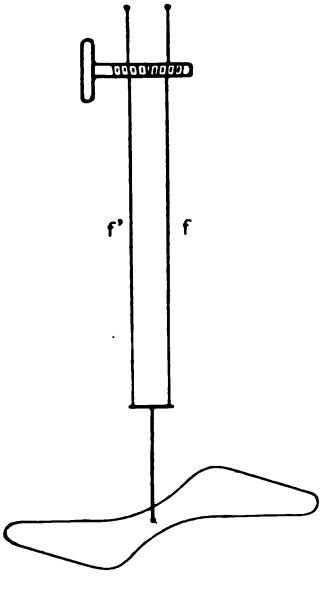


Fig. 9.

sens, est équilibrée en fixant la bobine mobile à l'un des bras du fléau d'une balance dont l'autre bras porte un plateau qu'on charge de poids.

Un autre exemple est la suspension bifilaire des électromètres à quadrants. Lorsqu'une palette électrisée est soumise à un couple agissant dans le plan horizontal, on peut équilibrer ce couple en suspendant la palette à deux fils minces ff',

légèrement écartés, fig. 9. Par le déplacement angulaire de la palette, le centre de gravité du système remonte, ce qui détermine un couple antagoniste proportionnel, pour les déviations faibles, à l'angle de torsion, à l'écartement des fils, au poids suspendu et inversement proportionnel à la longueur de la suspension. Ce système n'est guère utilisé que lorsqu'il faut pouvoir varier le couple antagoniste, résultat réalisable en modifiant l'écartement des brins. A cet effet on fait passer ceux-ci sur les deux moitiés d'une vis filetées en sens inverses. En tournant cette vis dans un sens les deux brins se rapprochent, tandis qu'ils s'éloignent si l'on tourne la vis dans le sens opposé.

La pesanteur sert encore de force antagoniste dans un grand nombre de galvanomètres industriels où l'action électromagnétique est équilibrée par des poids exerçant des couples variables avec les déplacements du système mobile.

La suspension unifilaire est l'exemple le plus fréquent d'une réaction élastique antagoniste. Son action est souvent combinée à l'une des précédentes.

C'est Coulomb qui a utilisé le premier la réaction de torsion d'un fil pour mesurer les répulsions électriques. Il a reconnu expérimentalement que le couple de torsion d'un fil vertical détourné de sa position d'équilibre est proportionnel à l'angle de déviation, à la quatrième puissance du diamètre du fil et inversement proportionnel à la longueur de ce dernier :

$$c = k \frac{d^4}{l} \alpha.$$

Le coefficient k dépend de la nature du fil et de sa température ; il est proportionnel au module d'élasticité du fil.

L'influence considérable du diamètre fait rechercher les corps les plus tenaces, qui permettent de réduire cet élément autant que possible. Parmi les substances conductrices, l'argent, le bronze phosphoreux et le bronze d'aluminium sont particulièrement avantageux, eu égard au rapport de leur élasticité à leur ténacité. Ils sont fixés par une soudure à l'étain. Toutefois certains isolants, la soie et le quartz entr'autres, sont très supérieurs aux conducteurs.

Les fils de cocon, qui sont les plus employés pour les appareils de grande sensibilité, ont une ténacité 13 fois plus grande que celle des fils d'argent, ce qui permet de diminuer considérablement le diamètre et, par suite, la réaction de torsion. Si le poids à supporter est lourd, on réunit plusieurs brins en un faisceau. Le couple de torsion est alors à peu près égal à la somme des couples correspondant aux divers filaments composants.

Pour préparer une suspension, on dévide les fibres intérieures d'un cocon dégraissé au moyen d'une lessive alcaline. On sépare les deux brins qui composent chaque fil et l'on détord ces brins en y suspendant des poids pendant quelques semaines. Les fils ainsi apprêtés sont liés aux pièces qu'ils doivent soutenir. On assure l'invariabilité du nœud par une gouttelette de gomme-laque.

Le fil de cocon a l'inconvénient de se tordre sous l'influence des variations hygrométriques de l'air. M. Vernon Boys a évité cette difficulté en substituant à la soie des fils de quartz, qu'on obtient sous une grande ténuité en étirant rapidement une goutte de quartz fondu au chalumeau oxhydrique. Ces fils jouissent d'une ténacité extrême. Ils se fixent au moyen de cire à cacheter ou de gomme-laque.

Depuis quelques années on utilise des fils métalliques aplatis qui, à ténacité égale, possèdent une sensibilité à la torsion supérieure à celle des fils ronds. MM. Ayrton et Perry ont comparé deux fils de suspension de même section, l'un rond de 0,254 mm de diamètre, l'autre rectangulaire de 0,7128 mm sur 0,0712 mm. Pour un même couple, la déviation est 5 fois plus forte avec le second fil, l'effet de cisaillement est moitié moindre, ce qui diminue les chances de déplacement du zéro, et, dans le cas où la suspension doit être traversée par un courant, le refroidissement est à peu près double avec la bande.

On doit donner à la suspension unifilaire une assez grande longueur lorsque les angles de torsion dépassent quelques degrés, afin de ne pas atteindre la limite d'élasticité qui produirait une torsion permanente.

En vue d'éviter le défaut de retour au zéro des suspensions métalliques après une forte déviation, il faut recourir aux corps, tels que le bronze phosphoreux, dont la viscosité est la plus faible. A cet égard, l'écrouissage est avantageux, bien qu'il renforce le couple de torsion.

Pour restreindre la hauteur des suspensions, on développe la force directrice par un boudin métallique, dans l'axe duquel est tendu un fil de soie qui supporte l'équipage mobile. Un tel dispositif est susceptible de résister à des torsions considérables. La permanence des ressorts à boudin est remarquable. M. Kohlrausch cite un resort d'acier dont l'élasticité n'a pas varié de 0,1 pour 100 en 7 ans. Le couple de torsion d'un fil enroulé en hélice est sensiblement équivalent à celui d'un fil droit, de même section et d'une longueur égale à la longueur développée de l'hélice. Il est d'ailleurs indépendant du rayon de l'hélice.

Pour fabriquer des ressorts réguliers, on enroule le fil en spires serrées sur un mandrin cylindrique, puis on use la surface extérieure du boudin de manière à supprimer les fibres les plus déformées. Le boudin garde alors la forme qu'on lui a donnée.

Dans quelques appareils on fait usage de ressorts directeurs en forme de spirale, en réduisant ainsi au minimum l'espace occupé en hauteur. L'équipage mobile pivote alors entre pointes.

Il faut éviter les ressorts en matière magnétique, qui sont susceptibles d'être influencés par les aimants et les courants.

La chaleur fait varier l'élasticité des fils métalliques. Le coefficient de torsion à $t°$C est

$$K_t = K_0 (1 - \alpha t - \beta t^2).$$

Pour le cuivre,

$$\alpha = 5{,}2 \times 10^{-4} \quad \text{et} \quad \beta = 2{,}8 \times 10^{-7}.$$

Ces changements sont négligeables dans les appareils industriels.

Quelquefois on utilise l'allongement des ressorts à boudin pour mesurer des efforts dirigés suivant leur axe. Les allon-

gements élastiques sont sensiblement proportionnels aux forces qui les déterminent ; mais ils ont l'inconvénient d'être très faibles et partant difficiles à apprécier avec exactitude, sans le secours de procédés optiques ou mécaniques spéciaux.

MM. Ayrton et Perry ont remarqué que, lorsqu'on suspend un poids à un ressort à boudin fixé par le haut, l'extrémité inférieure tourne d'un angle proportionnel à la tension. Pour évaluer cette rotation avec précision, il suffit de fixer à l'extrémité libre une longue aiguille indicatrice normale à l'axe du ressort.

Lorsque l'axe de rotation d'un équipage mobile est horizontal, on le supporte entre des fils tendus ou sur couteaux. Ceux-ci sont avantageusement remplacés par des pointes, qui donnent une ligne de support bien nette.

Les équipages pivotants doivent avoir des pivots à pointes très dures, en osmiure d'iridium par exemple, portant sur des chapes en agate. On évite le serrage excessif des pivots en montant l'une des chapes sur ressort.

Mesure des temps. — Un assez grand nombre de mesures électriques entraînent la détermination de la durée d'un phénomène. Par exemple, pour évaluer la durée d'une oscillation complète de l'équipage mobile d'un galvanomètre animé d'un mouvement périodique isochrone, on observe le passage du système oscillant par l'une de ses positions extrêmes, à l'aide de l'un des procédés décrits pour la mesure des angles, et l'on estime, au moyen d'un chronomètre, le temps requis par un nombre déterminé d'oscillations.

Les *compte-secondes* employés à cette fin sont des appareils dont l'aiguille des secondes peut être mise en mouvement à l'instant précis du commencement des observations et arrêtée à la fin de celles-ci en appuyant simplement le doigt sur un bouton.

Pour les expériences très précises on préfère les *compte-secondes à pointage*, dans lesquels, au lieu d'arrêter l'aiguille, on inscrit, par un point noir sur le cadran, sa position au moment à noter.

Le dispositif précédent oblige à nettoyer fréquemment le

cadran. Pour supprimer cet inconvénient, on utilise le *compte-secondes à dédoublante* pourvu de deux aiguilles superposées. L'une de celles-ci est mise en marche d'une manière continue et l'on marque le temps de départ par l'autre demeurée immobile. A la fin d'une observation, on presse sur une goupille et la seconde aiguille vient occuper la position momentanée de la première, qui continue à tourner. On mesure dans ce cas la durée d'un phénomène par l'écart des positions successives de la dédoublante, qui indique le commencement d'une nouvelle observation et ainsi de suite.

Il faut soustraire les appareils de mesure du temps employés par les électriciens à l'influence des électro-aimants. A ce point de vue, les ressorts et balanciers seront de préférence fabriqués en palladium ou, mieux encore, en invar.

Enregistrement des déviations. Procédé de Richard. Procédé photographique. Méthode de l'auteur. Méthode de Frölich. Méthode de Blondel. — Il est souvent utile d'inscrire automatiquement les déviations d'un système mobile autour d'un axe. Un enregistreur remplit l'office d'un observateur fidèle et infatigable lorsqu'il s'agit de phénomènes à allure

Fig. 10.

lente. Il permet aussi de saisir au vol des déplacements qui, par leur rapidité, échappent à l'analyse de nos sens.

La fig. 10 montre l'appareil Richard employé pour enregistrer les déviations de l'aiguille d'un wattmètre. La pièce mobile porte une tige flexible terminée par une plume remplie d'encre à base de glycérine. L'absorption de l'humidité de l'air par la glycérine entretient la fluidité de l'encre. La plume appuie contre un tambour recouvert de papier divisé et animé d'un mouvement de rotation grâce à un mécanisme d'horlogerie intérieur. La combinaison des mouvements de la plume et du tambour trace sur le papier une courbe continue, qui représente les déviations en fonction du temps.

La plume Richard est un godet en pyramide triangulaire à bec fendu. MM. Chauvin et Arnoux se servent d'une molette formée de deux parties serrées sur un disque poreux rempli d'encre. Le roulement de la molette atténue le frottement, mais l'inertie de l'index est plus grande.

Pour réduire davantage encore la friction, on rend dans certains enregistreurs le contact de la plume périodique, grâce à un mécanisme d'horlogerie ou à un électro-aimant.

Le procédé d'inscription directe n'est pas applicable aux oscillations rapides. Il ne peut pas non plus être utilisé avec les galvanomètres à suspension délicate, dont les déplacements seraient gênés par le frottement de la plume sur le tambour. On préfère alors enregistrer les oscillations par un moyen photographique.

Dans ce but, le système mobile est placé, dans une chambre obscure, devant un cylindre animé d'un mouvement de rotation rapide et aussi uniforme que possible. Un faisceau de lumière, provenant d'une lampe, est projeté sur un miroir que porte le système oscillant et réfléchi sur une feuille de papier photographique sensible recouvrant le cylindre enregistreur. Le faisceau est concentré à l'aide de lentilles, de manière à donner une image bien nette sur le papier. Si l'on veut obtenir un point lumineux très réduit, on envoie par une fente étroite un faisceau coupé près du papier par une fente perpendiculaire à la précédente. Les oscillations sont enregistrées sous forme d'une courbe ondulée que le développement de la feuille sensible fait apparaître. Pour graduer les abscisses de la courbe, qui

figurent les temps, on enregistre à côté de celle-ci les vibrations d'un diapason de période connue. A cette fin, un miroir est fixé sur l'une des branches du diapason, dont le mouvement est entretenu par un mécanisme analogue à celui des sonneries trembleuses. Un faisceau de lumière réfléchi par le miroir trace sur le cylindre enregistreur une courbe périodique constituant l'échelle des temps.

L'auteur a simplifié ce procédé. Dans la fig. 11, *m* représente le miroir concave d'un galvanomètre traversé par des

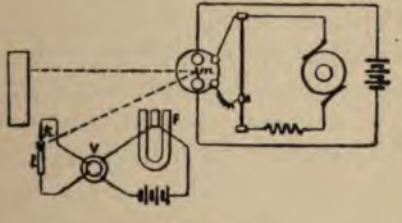


Fig. 11.

courants à variations rapides. Sur ce miroir on envoie un faisceau lumineux intermittent, produit par l'étincelle secondaire qu'une bobine d'induction V fait éclater entre une pointe de charbon *l* et un fil épais de magnésium *k*. Les interruptions du circuit primaire de la bobine sont réglées par un électrodiapason F. Le faisceau lumineux, réfléchi par le miroir et concentré par une grande lentille biconvexe, vient former une image de l'étincelle sur une feuille de papier sensible tendue soit sur un cylindre possédant un mouvement rotatif, soit sur une planchette verticale animée d'un mouvement de descente. On obtient ainsi une courbe pointillée lors du développement de l'image. En menant par les points successifs des normales à la direction du déplacement du papier, on gradue l'axe des temps en intervalles correspondant à des durées égales et déterminées. S'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur des intervalles, mais si l'on désire simplement diviser l'axe des temps en parties d'égale durée, on peut, au lieu du diapason, utiliser le ressort interrupteur de la bobine de Ruhmkorff. Pour obtenir une étincelle bien nette, on ajoute

une bouteille de Leyde en dérivation par rapport aux bornes secondaires.

Afin de montrer à un auditoire la forme des courbes représentant des courants périodiques, M. Frölich fait usage du dispositif suivant. Une lampe à arc émet un faisceau lumineux convergent vers un petit miroir fixé, près du milieu du rayon, au diaphragme d'un téléphone parcouru par les courants étudiés. Les rayons réfléchis vont frapper un prisme dont les faces sont couvertes de miroirs plans et auquel on imprime un mouvement de rotation rapide. Le faisceau est enfin reçu sur un écran translucide. Lorsque la vitesse angulaire des miroirs tournants est convenablement réglée par rapport à la période des courants qu'il s'agit de représenter et quand ceux-ci se succèdent assez rapidement, on voit sur l'écran, en vertu de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, les courbes figurant les ondulations des courants. En remplaçant l'écran par une plaque photographique, on peut enregistrer ces dernières.

Voici une autre méthode, imaginée par M. Blondel, pour atteindre le même résultat. Le trait lumineux vertical ou le filament de la lampe à incandescence qui éclaire le miroir porté par l'équipage oscillant est placé derrière un disque percé de fentes radiales et tournant autour d'un axe horizontal. Le disque est entraîné par un moteur réglé de manière que chaque fente radiale défile devant le filament pendant la durée d'une période. On obtient ainsi l'effet d'un point lumineux qui se déplace. Son image réfléchie décrit sur un écran ou sur une plaque photographique une courbe figurant le mouvement du miroir oscillant.

Mesure des vitesses. — Les essais des dynamos conduisent à déterminer le nombre de révolutions d'organes dont le mouvement de rotation peut être considéré comme uniforme pendant un temps donné. Pour arriver à ce résultat, on adapte à l'arbre tournant un *compte-tours*, qui indique soit par une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué, soit à l'aide de chiffres mobiles. L'axe des compte-tours, qui comportent un mécanisme des plus simples, est pourvu d'un pointeau en

acier trempé et en forme de pyramide triangulaire. On pousse ce pointeau dans un trou ménagé dans l'extrémité de l'arbre de la machine examinée. Les arêtes de la pyramide, en mordant dans les parois de la cavité, sont entraînées par l'arbre et communiquent la vitesse de celui-ci au compteur. Cependant, des glissements sont possibles. Aussi, pour atteindre une exactitude rigoureuse, est-il bon d'attacher l'axe du compteur à l'arbre mobile au moyen d'un boudin métallique fixé de part et d'autre.

Pour se servir des compte-tours à pointeau, on pousse ce dernier contre l'arbre, en même temps qu'on fait partir un compte-secondes, et l'on retire le pointeau quand l'aiguille du compte-secondes marque une minute. Cette façon de procéder peut entraîner une erreur par suite de l'inertie du compteur, qui fait perdre quelques révolutions au début. Il est vrai que la même cause amène une légère compensation lors du retrait. Une demi-seconde en plus ou en moins sur une minute produit une erreur relative voisine du centième. Lorsqu'on utilise des compteurs de tours fixés à l'arbre, on fait partir l'aiguille du compte-secondes quand le compteur passe par zéro et on l'arrête quand celui-ci marque un nombre rond de centaines ou de milliers de tours. Avec ces appareils on évalue souvent la vitesse moyenne, en comptant les tours pendant plusieurs minutes.

Les compteurs à chiffres employés avec les machines lentes sont souvent à mouvement alternatif et commandés par une petite bielle, mue par l'arbre mobile.

Les compte-secondes servant aux expériences considérées doivent être non-magnétiques, car les dynamos sont susceptibles d'aimanter les appareils qui ne sont pas dans ce cas et de causer ainsi des erreurs sérieuses dans la mesure du temps.

La fig. 12 montre les deux faces d'un instrument, dû à M. Jaquet, qui renferme un compte-tours et un compte-secondes. Ce dernier est déclanché au moment où l'on appuie le pointeau contre l'arbre mobile et s'arrête quand on retire l'appareil, ce qui assure la simultanéité des deux lectures.

On fait quelquefois usage, pour rendre la mesure des vitesses

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

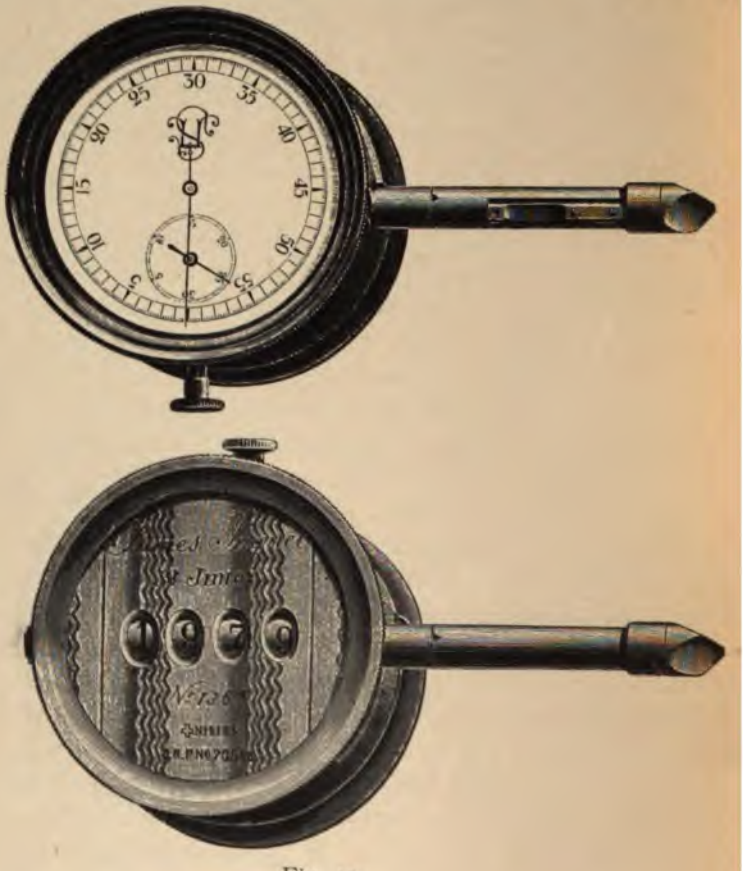


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

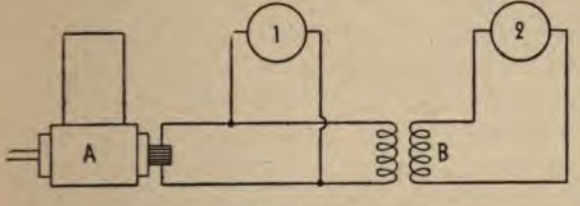


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

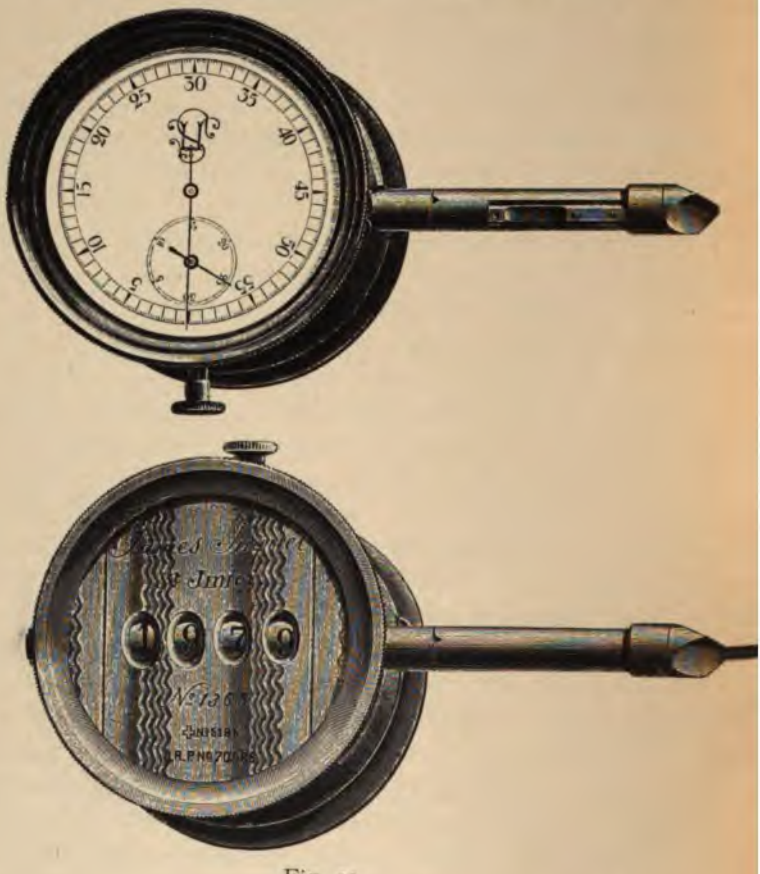


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

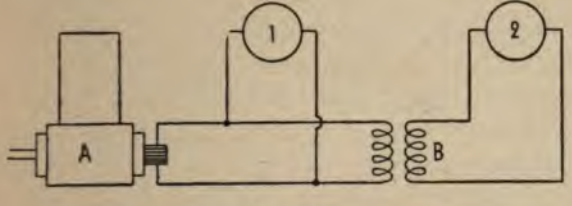


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

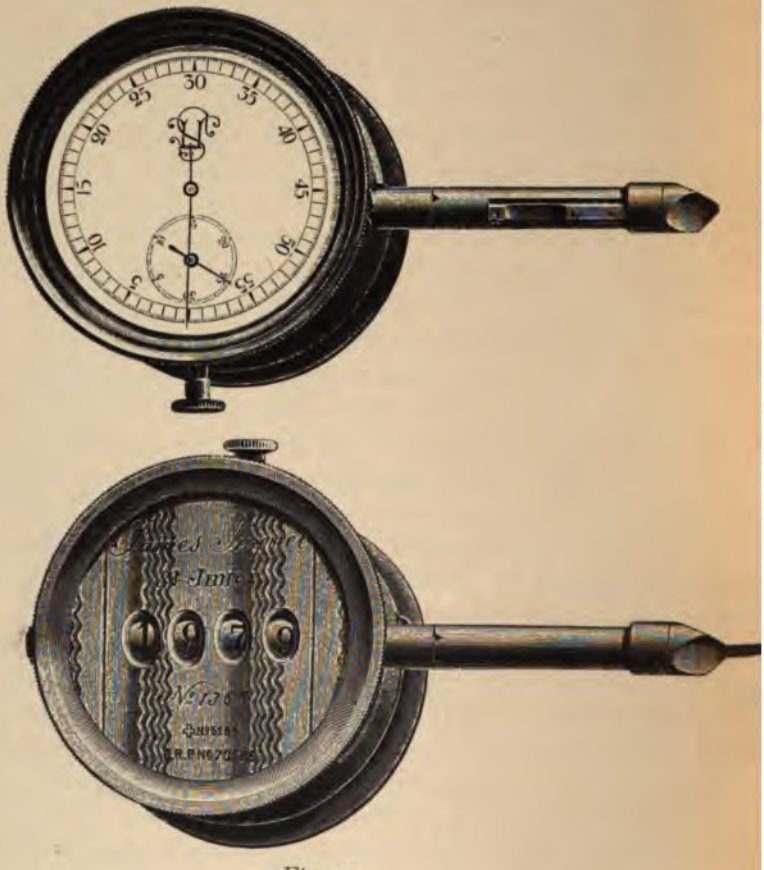


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

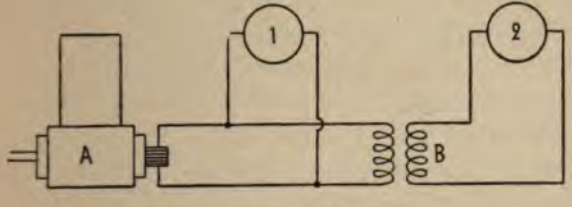


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

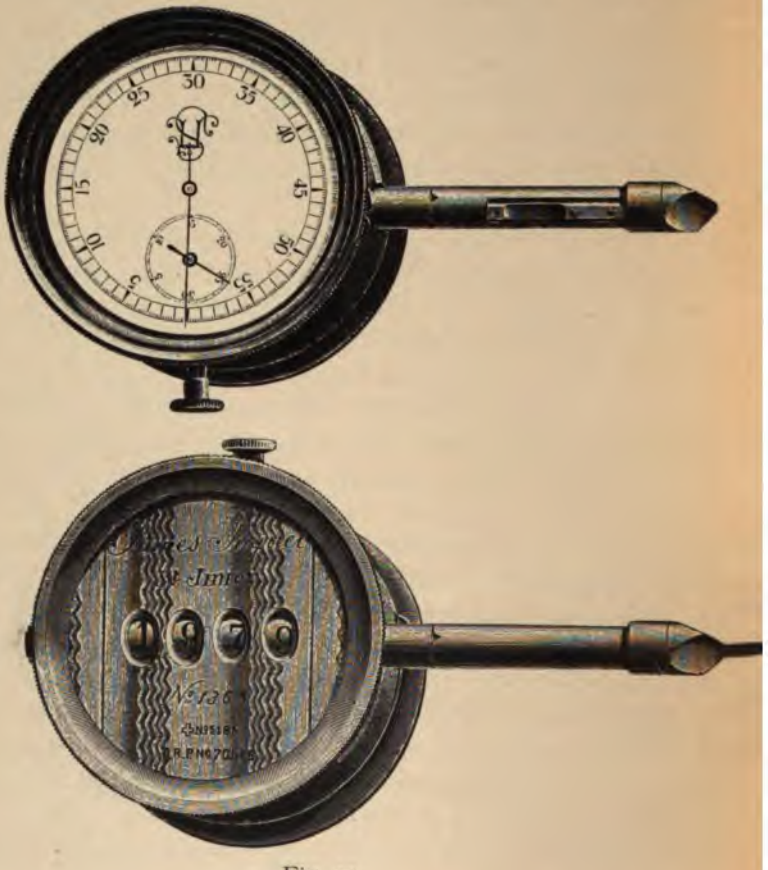


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

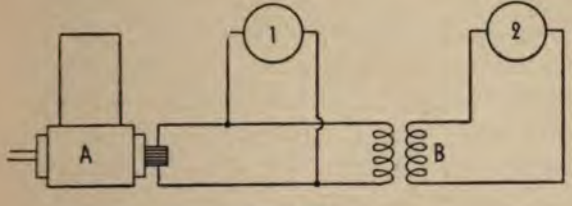


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

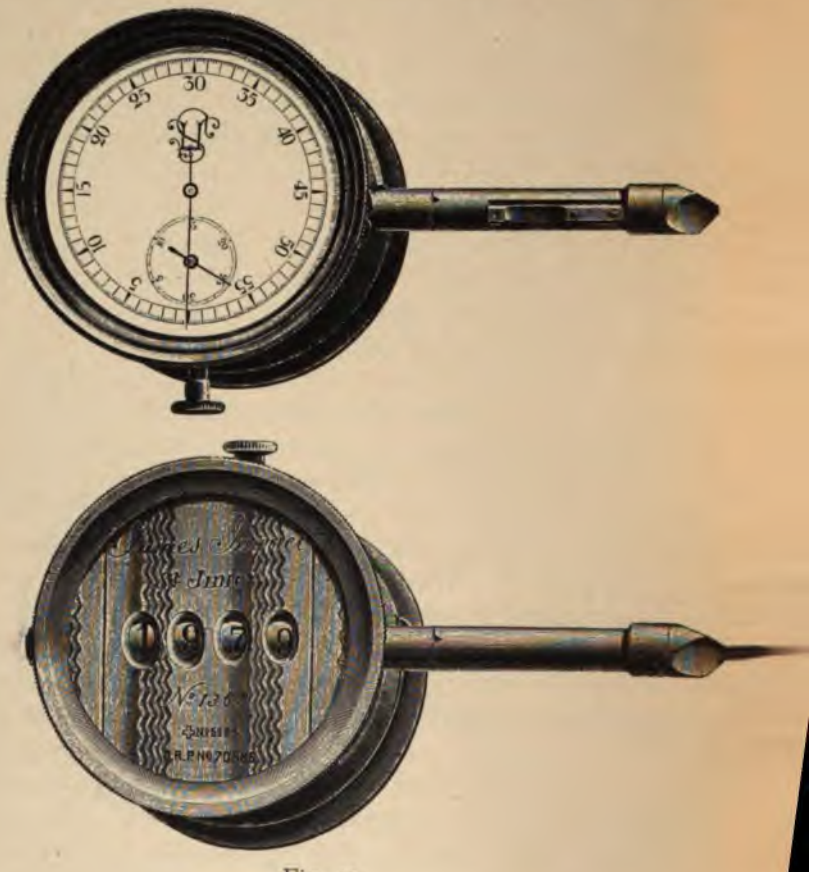


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

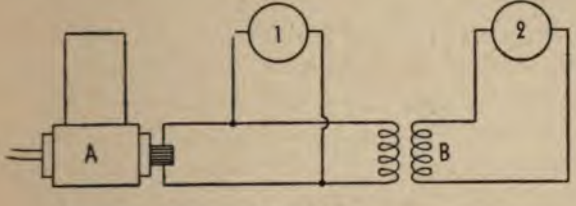


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

plus rapide, d'*indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des

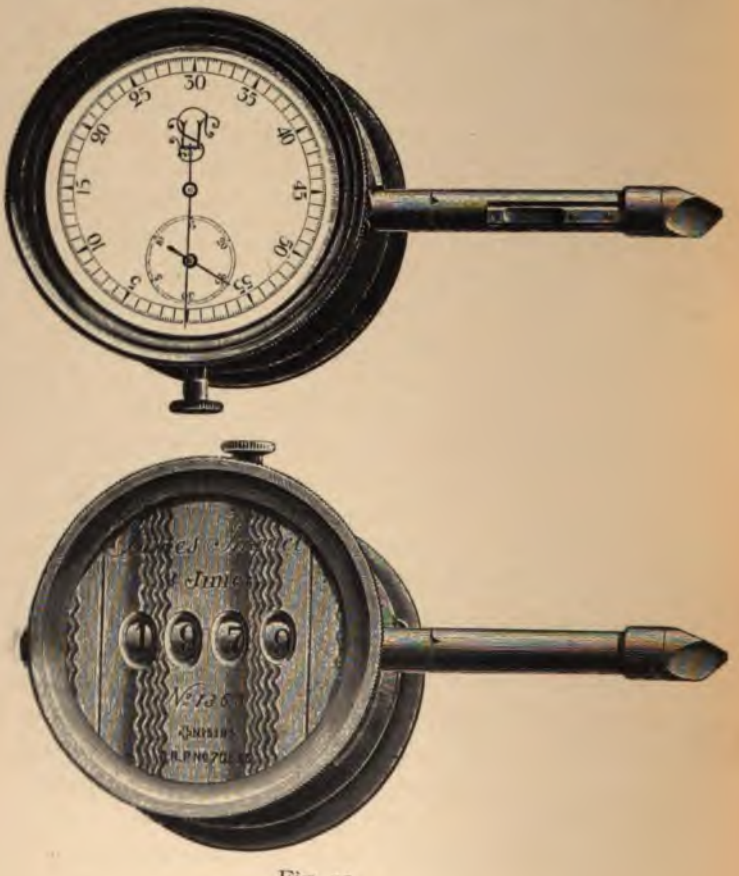


Fig. 12.

mobiles s'écartant plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment par une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente souvent d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des nombres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de la vitesse

d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple est de coller, sur un volant fixé à l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason vibrant. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas il est utile de recourir à la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous que présente un disque

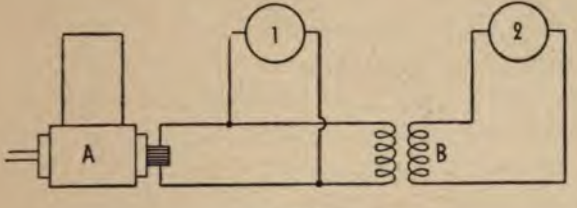


Fig. 13.

mobile dans le même sens. Quand la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement ses rayons comme s'ils tournaient en sens inverse. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de 0,01 tour par seconde à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on peut donc calculer aisément la vitesse cherchée.

La fig. 13 donne le schéma du *tachymètre-accéléromètre Owens*, dont l'usage est très pratique dans un laboratoire d'électrotechnique. A l'arbre du moteur étudié on adapte une magnéto A à courant continu, qui alimente un transformateur statique B. Un voltmètre 1 est gradué de manière à indiquer directement la vitesse, tandis qu'un voltmètre 2, influencé par les variations du courant primaire, permet de lire l'accélération.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord

la détermination du poids de vapeur sèche produite par kilogramme de charbon consumé : c'est là ce qui constitue l'effet utile de la chaudière. Vient ensuite la mesure du poids de vapeur sèche consommée par cheval-heure indiqué aux cylindres de la machine. Enfin il faut estimer le rapport entre la puissance effective disponible sur l'arbre du moteur et la puissance indiquée, rapport désigné sous le nom de rendement organique de la machine. On juge réellement de la valeur économique de celle-ci par la consommation de vapeur correspondant au cheval-heure effectif, mais, eu égard à la difficulté des essais au frein, il est rare qu'on détermine le travail effectif autrement que par la différence entre le travail indiqué en charge et le travail indiqué à vide.

Essai de la chaudière. Il convient tout d'abord de préciser la qualité du combustible employé. L'indication la plus exacte est fournie par une mesure calorimétrique, faite aisément au moyen de la bombe calorimétrique et donnant le pouvoir calorifique. A défaut d'une telle expérience, on peut faire exécuter par un chimiste le dosage du charbon en carbone et en hydrogène pour additionner les calories dégagées par la combustion de ces deux corps. Les échantillons doivent être prélevés sur le mélange pulvérisé de pelletées prises en divers endroits du tas de charbon servant à l'essai de la chaudière.

Quelquefois on fait un essai de vaporisation en 2 ou 3 heures. On le commence en pesant le charbon enflammé qui existe sur la grille ; on mesure le charbon au fur et à mesure du chargement ; on détermine le charbon restant sur la grille à la fin de l'essai et on déduit les cendres du charbon consommé. Une expérience de l'espèce laisse beaucoup d'incertitude.

Il est préférable de prolonger l'essai pendant 8 à 10 heures, en faisant en sorte que la grille soit chargée à peu près de la même manière au commencement et à la fin. Les différences qui peuvent exister de ce chef ont alors peu d'influence sur l'évaluation de la quantité totale de combustible brûlé. Il faut s'assurer de l'étanchéité des joints en laissant la chaudière en charge durant 12 à 24 heures et en notant l'abaissement du niveau de l'eau, ce qui fait connaître la perte horaire.

La manière de procéder suivante est recommandée par M. Kennedy.

Après avoir vérifié tous les joints et remplacé, au besoin, les valves par des tôles pleines dans les branchements non utilisés des conduites, on fait mettre la chaudière à feu deux heures avant l'essai, pour que toutes ses parties acquièrent leur température normale. Une quinzaine de minutes avant de commencer les mesures, on fait arrêter le chargement, nettoyer les feux et vider le trou aux cendres. La pression tombe, la machine alimentée fonctionnant à sa charge normale. Quand la chute atteint 5 pour 100, on marque le niveau de l'eau dans les tubes indicateurs, on note la pression et on commence les relevés. A partir de ce moment on charge du combustible pesé au fur et à mesure. On tient toujours prête la quantité de charbon brûlée en une demi-heure. On maintient la pression bien constante durant tout l'essai. A la fin, on laisse de nouveau descendre la pression jusqu'à la valeur initiale et l'on s'arrange de façon que le niveau de l'eau soit le même qu'au début. On arrête alors l'expérience.

On fait analyser un échantillon des cendres, pour déterminer la quantité de combustible qu'elles contiennent encore.

Pour permettre l'évaluation de l'eau vaporisée, la pompe alimentaire puise dans un bac jaugé pourvu d'un thermomètre. Le chauffeur doit maintenir le niveau de l'eau dans la chaudière aussi constant que possible pendant l'expérience. Avant de vérifier le niveau, il faut vider les tubes indicateurs afin d'établir l'équilibre des températures.

Il convient de mesurer l'eau de primage entraînée par la vapeur. Le moyen le plus commode consiste à ajouter 1 pour 1000 de chlorure sodique à l'eau d'alimentation. Ce sel subsiste dans l'eau de primage. On recueille de temps en temps une petite quantité de vapeur par un orifice percé, près de la machine, dans le tuyau d'amenée du fluide. Cette vapeur est condensée dans un serpentin. On prélève des volumes égaux de l'eau de condensation ainsi obtenue et de l'eau alimentaire. On introduit dans ces deux prises d'essai du chromate de potassium, puis on ajoute une solution de nitrate

d'argent. Il se forme un précipité blanc de chlorure d'argent tant qu'il reste du chlorure sodique ; ensuite il se produit du chromate d'argent rouge. Les poids de solution de nitrate d'argent à verser dans les deux prises d'essai pour déterminer la coloration rouge sont dans le rapport des quantités de sel marin contenues. On peut ainsi estimer la proportion d'eau de primage, cette dernière ayant seule pu amener du chlorure sodique dans la vapeur condensée. La densité des solutions de chromate de potassium et de nitrate d'argent ne joue aucun rôle.

Il faut être en garde contre certaines fraudes dans les essais de chaudières.

Si, à la fin de l'essai, le chauffeur alimente avec de l'eau froide, après avoir laissé descendre fortement le niveau, la quantité de chaleur contenue dans la chaudière est inférieure à ce qu'elle était au début.

De même, si, avant l'essai, le chauffeur ouvre brusquement la valve d'admission, les poches de vapeur se vident et le niveau descend. A la fin, on peut reformer les poches, de manière à faire remonter le niveau, en fermant graduellement la valve.

Pour réduire le poids apparent de charbon brûlé, le chauffeur met les scories sur les côtés de la grille pendant l'essai, puis les ramène sur le foyer à la fin, en les faisant compter comme combustible.

Essai de la machine à vapeur. Le poids de vapeur sèche consommée par cheval-heure indiqué se déduit des expériences précédentes, des données fournies par les indicateurs et de la vitesse.

Dans le cas particulier où la machine est pourvue d'un condenseur par surface, le poids d'eau condensée, correction faite comme plus haut pour l'eau de primage, représente très exactement la vapeur consommée. On peut alors restreindre à une ou deux heures la durée de l'essai du moteur.

C'est au dernier procédé qu'on a le plus souvent recours avec les turbines à vapeur, pour lesquelles on indique habituellement le poids de vapeur consommée par kilowatt-heure aux bornes des dynamos qu'elles attaquent directement.

Mesure de la puissance mécanique. Indicateur Crosby. Dynamomètre de transmission von Hefner-Altenek. Frein à corde. — La détermination du rendement d'une dynamo conduite par un moteur à vapeur nécessite parfois l'estimation du travail fourni par le moteur. Ce travail est égal à l'énergie mécanique développée par la vapeur dans les cylindres, diminuée des pertes dues aux frottements de la machine.

Pour évaluer le travail de la vapeur on se sert d'*indicateurs*, qui permettent de déterminer la pression moyenne de la vapeur dans chaque cylindre. L'un des plus employés pour l'essai des machines à grande vitesse, utilisées fréquemment pour conduire les dynamos, est l'indicateur Crosby, fig. 14 et 15.

Fig. 14.

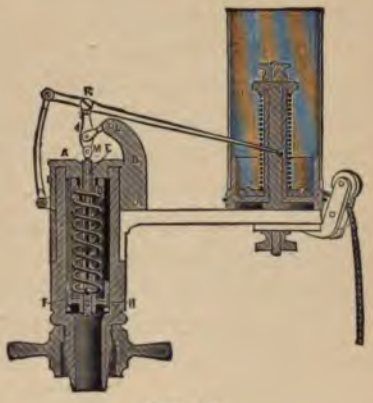


Fig. 15.

On visse sur chacune des extrémités du cylindre à vapeur un petit cylindre contenant un piston sollicité vers le bas par un ressort taré à double hélice. Au piston est adaptée une tige traversant librement le fond supérieur du cylindre et dont les déplacements sont amplifiés par une série de tringles articulées qui meuvent la pointe d'un style en laiton sur une feuille de papier préparé au blanc de zinc enroulée autour d'un tambour. Ce dernier reçoit un mouvement alternatif, lié avec celui du piston moteur, par l'intermédiaire d'une corde de chanvre attachée à un levier oscillant entraîné par la tige de ce piston. Les bras du levier sont proportionnés de manière que la

course du piston moteur corresponde à peu près à une révolution du tambour mobile. La corde reste toujours tendue grâce à un ressort de rappel à boudin, disposé à l'intérieur du tambour. Il faut que, dans sa position moyenne, le levier soit normal à la direction de la corde et que le plan dans lequel il oscille soit sensiblement tangent au tambour, pour que les déplacements angulaires de celui-ci soient proportionnels aux chemins parcourus par le piston de la machine. Il convient que la corde soit aussi courte que possible. Les tuyaux raccordant les indicateurs au cylindre du moteur doivent être gros et courts. Il n'est pas recommandable d'employer le même indicateur pour les deux extrémités du cylindre, sauf avec les machines dont la marche lente laisse à l'équilibre des pressions le temps de s'établir.

On commence par tracer la ligne atmosphérique. On s'assure que la course du traceur est normale. On a soin de purger le cylindre de l'indicateur et la conduite de raccordement immédiatement avant de prendre des diagrammes. Dans ce but l'indicateur est pourvu d'un robinet à trois voies. On laisse le style parcourir son cycle une dizaine de fois pour obtenir une courbe moyenne.

En vue de graduer l'indicateur, on l'adapte à une chaudière où l'on fait varier la pression, celle-ci étant mesurée par un manomètre à air libre ou par des poids agissant sur le piston d'un cylindre de diamètre connu qui communique avec le même générateur. Par ce moyen on élimine l'influence des fuites éventuelles de l'indicateur et l'on porte celui-ci à sa température de service. A défaut d'une chaudière disposée pour ce tarage, on gradue les ressorts des indicateurs au moyen de poids dont on charge le centre de leur piston par l'intermédiaire d'une tige. A cet effet l'indicateur est maintenu renversé dans un étau, de manière que l'axe de son cylindre soit bien vertical. On a soin d'immerger au préalable ce dernier dans l'eau bouillante, afin d'amener le ressort à une température qui ne soit pas trop éloignée de la température normale. On détermine par les procédés ci-dessus les pressions correspondant aux ordonnées des courbes tracées sur le tambour enregistreur.

Les diagrammes fournis par les indicateurs fixés aux deux extrémités du cylindre moteur sont surfacés, par la méthode de Simpson ou à l'aide du planimètre d'Amsler, en vue de déterminer la pression moyenne de la vapeur. Lorsqu'on fait usage du planimètre, on contourne deux fois chaque diagramme. Un moyen de calcul rapide sans appareil consiste à diviser la base du diagramme en dix parties égales et à ajouter les ordonnées correspondantes sur une bande de papier; le dixième de la longueur totale représente sensiblement l'ordonnée moyenne.

Connaissant, d'autre part, les dimensions du piston du moteur, sa course et le nombre de tours effectués par seconde, on détermine aisément la puissance développée par la vapeur. On calcule une constante contenant toutes les données, sauf la pression moyenne et la vitesse, et qu'il suffit de multiplier par ces deux éléments pour avoir la puissance.

Il faut avoir soin de ne relever les diagrammes que lorsque l'indicateur a atteint sa température normale. On veillera à ce que le style conserve dans son support la même position que pendant le tarage. Une déviation de la pointe peut altérer les ordonnées au point d'occasionner une inexactitude de plusieurs centièmes. L'emploi des indicateurs expose à des erreurs qui, en s'accumulant, peuvent fausser notablement les résultats. Il est donc nécessaire de multiplier les essais, en vue d'obtenir des moyennes. Il est bon de permuter les emplacements des indicateurs.

On inscrit sur les diagrammes relevés un numéro d'ordre et la date. Dans un tableau spécial on note, suivant des colonnes successives, l'heure des essais, le numéro des diagrammes, le nombre de tours par minute et, pour contrôle, la pression de la vapeur à l'entrée de la machine. On commence par 1, 101, 201, 301, 401, 501 pour numéroter les séries de diagrammes pris des deux côtés des cylindres à haute, moyenne et basse pression.

Les *dynamomètres de transmission* permettent de déterminer l'effort transmis par une courroie à une machine électrique, en relevant la différence entre les tensions du brin conducteur et du brin conduit.

Le modèle de M. von Hefner-Altenek est un des plus connus. Cet appareil, qui se fixe entre le moteur et la dynamo, porte sept galets entre lesquels passe la courroie, fig. 16. Le galet du milieu peut seul se déplacer; les autres ne servent qu'à guider les deux brins, afin qu'ils exercent sur le galet médian des pressions directement opposées. Ce galet pivote autour d'un axe qui se confond avec celui du petit galet de gauche; il est équilibré par un contrepoids, dont le support oscille devant une ligne de repère, et les mouvements du système sont amortis par une cataracte à air. Par suite de la

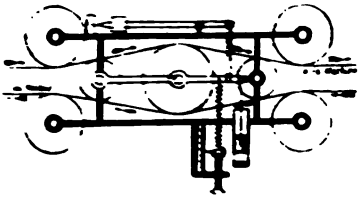


Fig. 16.

tension prédominante du brin conducteur, situé à la partie inférieure dans la fig. 16, le galet mobile tend à être soulevé au dessus de sa position de symétrie, ce qu'indique l'index qui s'abaisse. Pour le ramener dans cette position, on agit sur un ressort gradué de manière à marquer sur l'échelle de ses allongements la différence des tensions des brins. La graduation s'obtient en fixant le dynamomètre verticalement et en suspendant aux deux brins de la courroie, qu'on empêche de glisser, une série de poids inégaux. Le déplacement à communiquer à l'extrémité du ressort pour amener l'index du contrepoids au repère est noté pour chaque valeur de la différence des tensions.

En même temps qu'on effectue la mesure dynamométrique, on relève la vitesse angulaire de la dynamo à l'aide d'un compte-tours. En multipliant le nombre de révolutions par minute par la circonférence moyenne d'enroulement de la courroie sur la poulie de la dynamo, on obtient la vitesse linéaire de la courroie. Le produit de cette vitesse par la différence des tensions des deux brins représente la puissance

mécanique absorbée par la dynamo. Il y a, toutefois, des erreurs dues au glissement de la courroie sur la poulie de la dynamo et aux frottements des galets du dynamomètre, dont une partie est comprise dans la puissance trouvée.

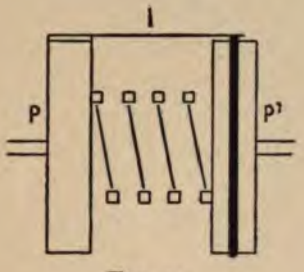


Fig. 17.

La fig. 17 montre schématiquement un dynamomètre plus précis que le précédent. L'axe conducteur et l'axe conduit portent des poulies P et P', réunies par un ressort. Un index I, fixé à la poulie P, appuie sur un conducteur enroulé autour de la poulie P' et parcouru par un courant électrique. La déviation d'un voltmètre relié, par des contacts glissants, à un point du conducteur et à l'index permet d'apprécier la position de celui-ci et, par suite, l'angle de torsion du ressort de transmission.

Les frottements intérieurs d'une machine à vapeur sont représentés par la différence entre le travail indiqué et le travail disponible sur l'arbre moteur. Ce dernier s'estime à l'aide du *frein de Prony*, qui le transforme en frottements mesurables. D'après les travaux de M. Thurston, confirmés par les expériences de M. Dwelshauvers-Dery, le travail mesuré au frein est sensiblement égal au travail indiqué en charge diminué du travail indiqué à vide. Le frein est également employé pour évaluer la puissance utile des moteurs électriques.

Pour cette dernière application on donne souvent aux freins la forme indiquée dans la fig. 18, qui a l'avantage de supprimer le réglage de l'équilibre, assez difficile à réaliser avec le modèle primitif. Sur une poulie adaptée à l'arbre mobile on place une

bande d'acier ou de toile retenue par un cavalier. Cette bande est attachée, d'une part, à une balance dynamométrique B surmontée d'un poids p' et supporte, d'autre part, un poids p.

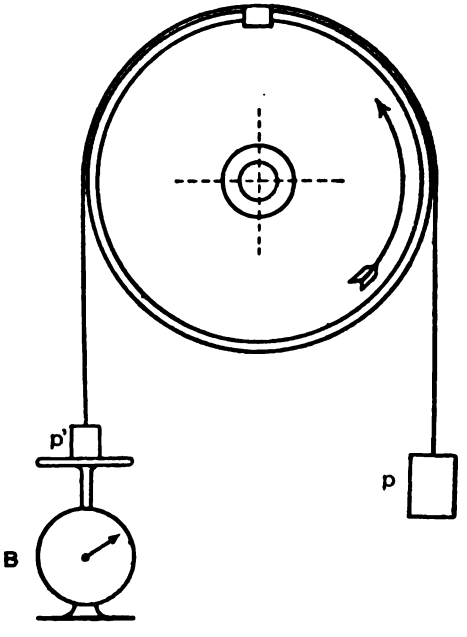


Fig. 18.

Le sens de rotation est tel que ce dernier poids tende à être soulevé.

En appelant p'' l'effort indiqué par la balance, on peut écrire, lorsqu'il y a équilibre entre le couple fr des frottements et le couple antagoniste $(p - p' - p'')$ R,

$$fr = (p - p' - p'')\,\mathrm{R}.$$

Si la bande est assez mince, on a sensiblement $r = \mathrm{R}$. En désignant par n le nombre de tours que la poulie effectue par seconde, la puissance utile P est, en chevaux, lorsque les forces sont exprimées en kilogrammes et les rayons en mètres,

$$\mathrm{P} = fr \times \frac{2\pi n}{75} = (p - p' - p'')\,\mathrm{R} \times \frac{2\pi n}{75}.$$

En watts la puissance vaut

$$P = (p - p' - p'')\,R \times \frac{2\pi n}{75} \times 736.$$

La lubrification du frein, destinée à éviter un échauffement nuisible, est faite au moyen d'eau savonneuse ou de graisse. Il faut que le frein soit bien équilibré avant la mise en place des poids dont on tient compte dans les formules précédentes, c'est-à-dire que toute force qui tendrait, au repos, à entraîner l'axe de la machine dans un sens ou dans l'autre soit compensée par un contrepoids convenable. Pour opérer ce réglage, on fait reposer l'induit de la dynamo par son arbre sur deux règles horizontales, afin de lui donner une grande mobilité. Si la bande enroulée sur la poulie est de section uniforme et symétriquement disposée par rapport à la verticale passant par l'axe de l'arbre, le réglage est inutile.

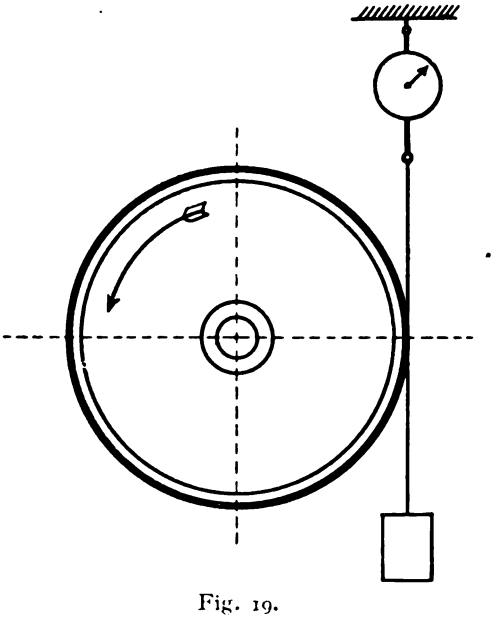


Fig. 19.

Pour l'essai de petits moteurs, on modifie parfois le frein comme il est représenté dans la fig. 19. Une bande de toile ou

une corde de chanvre, enroulée tout autour de la poulie en vue d'équilibrer les efforts sur les coussinets, est fixée, d'une part, à une balance dynamométrique et supporte, à l'autre bout, un plateau chargé de poids.

Avec des moteurs de 1 à 2 chevaux et des poulies de 20 à 30 cm de diamètre, une lubrification de la corde par quelques gouttes d'huile suffit. Avec des puissances plus élevées, on peut

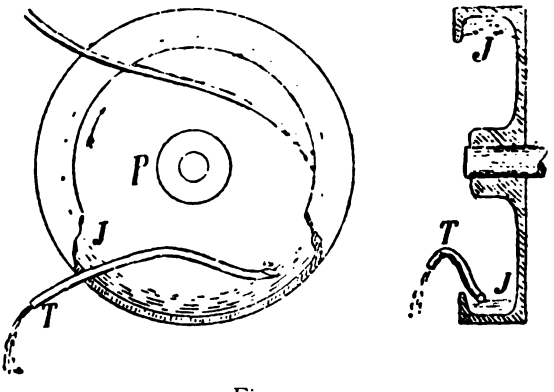


Fig. 20.

refroidir la poulie en adoptant la forme indiquée dans la fig. 20. Un jet d'eau est projeté dans une gorge intérieure de la poulie, où le liquide se maintient grâce à la force centrifuge. La circulation de l'eau est assurée par le tuyau T.

Dans le cas d'une lubrification par l'eau, il convient que la surface frottante S de la poulie, exprimée en m^2, soit liée à la puissance absorbée P, exprimée en chevaux, par la formule

$$S = \frac{P}{500}.$$

En l'absence de lubrifiant, la relation doit être

$$S = \frac{P}{70}.$$

La fig. 21 montre le frein électrique de M. Pasqualini, approprié aux puissances faibles et basé sur l'expérience du disque de Foucault. Un plateau en cuivre tourne devant les

pôles d'un inducteur monté sur un axe mobile. L'extrémité de ce dernier soutient un volant de grand moment d'inertie, dont

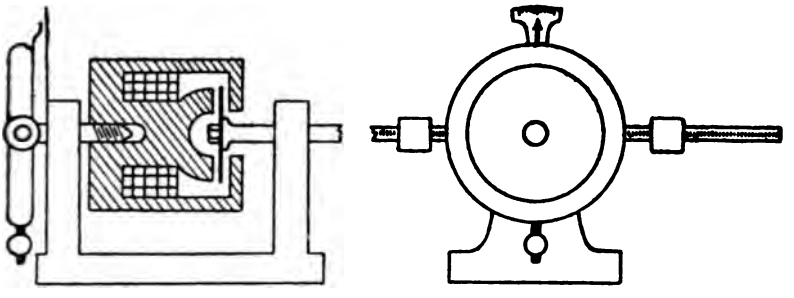


Fig. 21.

la position est repérée sur une graduation et qui porte deux règles horizontales le long desquelles on peut déplacer des poids permettant de varier et d'estimer le couple résistant. On évalue la puissance absorbée par le palier du disque en mesurant l'énergie électrique consommée par le moteur tournant avec et sans plateau.

Les freins et dynamomètres deviennent incommodes et peu exacts quand il s'agit de puissances importantes. Dans ces conditions on préfère attaquer par le moteur étudié une dynamo dont le rendement a été déterminé au préalable sous des charges variées. Il suffit alors de relever la puissance électrique débitée par la génératrice pour connaître la puissance mécanique qu'elle reçoit.

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Grandeurs considérées en photométrie. — Un foyer lumineux supposé réduit à un point émet des rayons dans toutes les directions. Ces rayons peuvent être comparés aux lignes de force qui, dans la théorie des forces centrales, émergent des centres agissants. Par analogie, on dira que le flux de lumière reste constant dans un cône divergent émanant de la source.

L'*intensité lumineuse* du foyer peut être définie, comme l'intensité d'un pôle magnétique, par le rapport du flux lumineux à l'angle solide qui l'enserre. Si l'on désigne par Φ le flux total issu d'un foyer punctiforme et distribué uniformément dans l'espace environnant, et par I l'intensité du foyer, on a

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}.$$

Par suite $\Phi = 4\pi I$, expression semblable à celle du théorème de Gauss.

Si le foyer éclaire inégalement dans les diverses directions, on peut définir son intensité lumineuse dans une direction donnée par le rapport du flux $d\Phi$ qu'il émet dans un angle

solide élémentaire, ayant cette direction pour axe, à la valeur $d\omega$ de cet angle :

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Inversement, le *flux lumineux* émis par une source punctiforme, dans une direction déterminée, à travers un angle solide élémentaire est le produit de cet angle par l'intensité lumineuse dans la direction considérée.

Le flux total qui traverse une surface quelconque est donné par l'expression

$$\Phi = \int I \, d\omega,$$

l'intégration étant étendue à toute la surface. Si le foyer rayonne également dans toutes les directions, on peut écrire

$$\Phi = I \int d\omega.$$

Cette formule peut être mise sous une autre forme. En appelant $d\sigma$ un élément de la surface frappée par le flux, r sa distance à la source et α l'angle d'incidence, il vient

$$\Phi = I \int \frac{d\sigma \cos \alpha}{r^2}.$$

On nomme *éclairement* en un point d'une surface le rapport du flux lumineux qui tombe sur un élément de la surface au point en question à l'aire de cet élément :

$$e = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Dans le cas d'une source punctiforme rayonnant uniformément un flux Φ, l'éclairement en chaque point d'une sphère de rayon r, ayant son centre au foyer, est

$$e = \frac{\Phi}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2},$$

I représentant l'intensité de la source.

L'éclairement d'un élément de surface oblique, recevant le flux sous un angle d'incidence α, est

$$e = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

Les sources lumineuses usuelles ne sont pas punctiformes l'on entend par *éclat* d'un foyer le rapport de l'intensité mesur normalement au foyer à la surface d'émission de celui-ci. Ains en désignant par I l'intensité normale d'une surface lum neuse s, l'éclat de cette dernière est

$$\varepsilon = \frac{I}{s}.$$

Si l'on considère une paroi lumineuse sous une direction oblique, le flux de lumière reçu par l'œil est moindre que si le rayon visuel est perpendiculaire à la paroi, puisque la surface d'émission apparente est plus petite. Le flux émis par unité de surface de la paroi dans une direction faisant un angle β avec la normale est $\varepsilon \cos \beta$. C'est pourquoi un globe lumineux paraît uniformément éclairé, le flux de lumière émis vers l'œil de l'observateur par chaque élément du globe étant le même que celui qu'émettrait la projection de l'élément normale au rayon visuel.

Ces considérations montrent qu'il est nécessaire, lorsqu'on compare deux plages lumineuses, de les examiner sous la même inclinaison.

Au point de vue subjectif il n'existe aucune différence essentielle entre la notion d'éclat et celle d'éclairement. Par rapport à l'œil, l'éclairement d'une surface est l'éclat de celle-ci devenue lumineuse par reflexion ou par transparence.

Voici deux autres grandeurs, d'un usage moins fréquent que les précédentes et qui ont été définies par M. Blondel.

L'[illegible], ou, pour éviter la confusion avec une autre [illegible] désignée en Angleterre sous le même nom, la *luminance* [illegible] est le produit de l'éclairement auquel il est [illegible]

Cette notion est essentielle en photographie ; elle intervient également dans les phénomènes de la vision, parce que l'œil doit être soumis à une lumination minima pour éprouver la sensation lumineuse.

La *quantité de lumière* ou *éclairage* est le produit du flux lumineux qui frappe un objet par la durée de l'éclairement :

$$Q = \Phi t.$$

Cette grandeur doit constituer la base rationnelle des marchés relatifs à l'éclairage. C'est la quantité de lumière fournie par un foyer en un temps donné qu'il faut payer et non l'intensité lumineuse, qui n'en est qu'un facteur.

Étalons de lumière. — Les étalons d'intensité lumineuse sont nombreux. C'est dire qu'aucun d'eux ne possède les qualités nécessaires pour justifier son emploi exclusif.

En France on a adopté, comme étalon d'intensité, la lumière émise horizontalement par la lampe *Carcel* employée avec les précautions minutieuses indiquées par Dumas et Regnault. Voici les données réglementaires :

Diamètre intérieur du tube porte-mèche . . .	23,5	mm
» » » d'amenée d'air . .	17,0	»
Hauteur totale de la cheminée	290,0	»
» de la cheminée jusqu'au coude . . .	61,0	»
Diamètre intérieur de la cheminée au sommet .	34,0	»
» » » » à la base . .	47,0	»
Épaisseur du verre	2,0	»
Saillie de la mèche	10,0	»
Distance verticale de la mèche au coude du verre	7,0	»

La mèche est une tresse de 75 brins et pèse 3,6 gr par dm. La lampe doit brûler avec une hauteur de flamme d'environ 40 mm et consommer 42 gr d'huile de colza épurée à l'heure. La mèche doit être allumée en quatre points à la fois, afin de ne pas donner une flamme irrégulière. Le poids d'huile consommée, qui constitue le critérium de l'étalon, est estimé à l'aide d'une balance spéciale, sur laquelle la lampe est placée pendant les mesures. On le contrôle de 5 en 5 minutes. Lorsque

la consommation varie de moins de 4 gr au voisinage de 42 gr, on admet que l'intensité suit une progression correspondante.

En Angleterre et aux États-Unis on s'est servi d'un étalon moins précis, mais plus commode : la bougie de blanc de baleine *(standard candle)*, de 6 à la livre anglaise. Cette bougie donne son intensité normale horizontalement lorsqu'elle brûle avec une hauteur de flamme de 45,5 mm et consomme 7,76 gr de spermaceti et de mèche par heure. On utilise maintenant l'étalon à gaz de penthane de M. *Vernon Harcourt*, qui vaut sensiblement 10 candles. Cette lampe, pourvue d'une cheminée, est moins affectée par les courants d'air que les flammes nues. Sa composition lumineuse se rapproche de celle d'une lampe électrique à incandescence à 3 watts par bougie.

Les Allemands ont employé la bougie de paraffine *(Vereins-kerze)*, de 12 au kilogramme, dont la flamme mesure environ 50 mm de hauteur. Ils se servent actuellement d'une petite

Fig. 22.

lampe à mèche, étudiée par M. *von Hefner* et brûlant de l'acétate d'amyle, fig. 22. La mèche est constituée par un faisceau de brins de coton sortant d'un tube en maillechort ayant 8 mm de diamètre intérieur, 8,3 mm de diamètre extérieur et 25 mm de saillie. La flamme, utilisée après 10 minutes d'allumage au moins, doit avoir 40 mm du bord du tube au sommet. La hauteur s'apprécie à l'aide d'une lentille située à égales distances de la flamme et d'un verre dépoli portant une graduation verti-

cale; l'image de la flamme s'inscrit sur la graduation. Si la hauteur h dépasse 40 mm, on a, pour l'intensité horizontale,

$$I = 1 + 0{,}025\,(h - 40);$$

pour une hauteur inférieure à 40 mm,

$$I = 1 - 0{,}03\,(40 - h).$$

Il importe d'adopter l'épaisseur indiquée pour le tube à mèche, l'intensité lumineuse étant diminuée par refroidissement si le tube est trop épais et, inversement, accrue si le tube est trop mince. Cet étalon, comme tous ceux à flamme, doit brûler dans un air pur et calme. Les impuretés de l'air et la vapeur d'eau diminuent la combustion et affaiblissent la lumière. D'après M. Liebenthal, l'intensité lumineuse de la lampe Hefner baisse de 0,5 pour 100 environ lorsque le volume de vapeur d'eau par m^3 d'air augmente d'un litre. Le changement de la pression barométrique entraîne une différence de 0,1 pour 100 par 10 mm de mercure au voisinage de la pression normale. De même, 0,1 pour 100 d'anhydride carbonique produit une diminution de 0,7 pour 100 de l'éclat. On voit l'utilité de bien ventiler les salles photométriques.

M. *Violle* a préconisé un étalon défini plus rigoureusement que les précédents. Dans ceux-ci la température du foyer n'est pas stipulée. L'étalon Violle est constitué par la lumière émise normalement par un centimètre carré de platine à la température de solidification (1775° C). Pour réaliser cet étalon, on fond environ 1 kilogramme de platine dans un creuset de chaux, à l'aide de la flamme oxhydrique, puis on laisse refroidir. Pendant la solidification du métal, qui dure quelques minutes, on observe la lumière rayonnée par la surface du bain à travers un diaphragme percé d'un orifice de 1 cm^2. On remarquera que les flammes étalons fournissent leur intensité normale, prise pour unité, suivant l'horizontale, tandis que l'étalon Violle doit être mesuré suivant une direction verticale. Si l'on ne peut dresser le banc photométrique, en mettant la lampe de comparaison au-dessus, on emploie un réflecteur à 45° dont le coefficient d'absorption est connu.

Comme étalon secondaire, le Congrès des Électriciens de 1889 a recommandé la *bougie décimale*, valant 1/20^{me} de l'étalon Violle et ainsi dénommée parce qu'elle représente un peu plus du dixième de la carcel.

Il est commode de se servir, pour la comparaison des lampes électriques, d'une lampe à incandescence étalonnée au préalable. Les lampes à incandescence ont l'avantage de permettre une variation de l'éclairement de l'écran photométrique sans déplacement: il suffit de modifier l'intensité du courant. La maison Siemens et Halske fabrique des lampes à filament droit disposé suivant l'axe d'un tube en verre bien régulier et qui rayonne également dans les plans passant par cet axe. M. Fleming utilise des lampes à boucles fabriquées par la firme Edison-Swan et dont les ampoules ont de grandes dimensions pour retarder le noircissement du verre. Ces foyers ne sont employés que pendant le temps nécessaire à la vérification des lampes à incandescence servant d'étalons secondaires.

Si l'on compare des foyers de compositions lumineuses différentes par l'intermédiaire d'étalons secondaires, les résultats ne sont pas les mêmes que si on les compare directement entr'eux, ce qui tient au phénomène de Purkinje. Les différences des sources sont accusées nettement par les rapports des éclats qui, pour l'étalon Hefner, l'étalon Violle et le cratère de l'arc voltaïque, sont entr'eux comme 1 : 47 : 20000.

Des expériences ont été poursuivies, en 1906, au Laboratoire Central d'Électricité et au Conservatoire des Arts et Métiers, en France, à la Reichsanstalt, en Allemagne, et au National Physical Laboratory, en Angleterre, sur les trois étalons les plus usités dans ces pays, à savoir: la Carcel, le Hefner et le Vernon-Harcourt. Voici les moyennes arrondies des résultats de ces trois séries d'essais, qui ont été faits dans des conditions d'état hygrométrique un peu différentes :

Vernon-Harcourt / carcel	Hefner / carcel	Hefner / Vernon-Harcourt	Hefner / bougie décimale
1,01	0,093	0,092	0,885

Système d'unités pratiques. — M. Blondel a proposé un système d'unités pratiques pour la mesure des grandeurs

photométriques. Ce système a été admis, après quelques modifications, par le Congrès de Genève de 1896.

L'unité fondamentale choisie est la *bougie décimale.*

L'unité de flux lumineux est le *lumen.* C'est le flux produit par une bougie décimale dans un angle solide égal à l'unité. Partant, un foyer punctiforme de 1 bougie décimale rayonne uniformément un flux total de 4π lumens.

L'unité d'éclairement, déjà proposée par M. Preece en 1889, est le *lux*, représenté par l'éclairement que fournit une bougie décimale sur une surface normale aux rayons placée à 1 m de distance. Cette unité était appelée auparavant *bougie décimale à un mètre.*

L'éclat d'un foyer étant une grandeur mesurée assez rarement, on a donné à son unité un nom composé, *bougie décimale par cm²*, qui rappelle sa définition.

Enfin l'unité d'éclairage ou de quantité de lumière est, conformément à la définition de la grandeur qu'elle sert à évaluer, le *lumen-heure.* Cette unité peut servir de base aux contrats d'éclairage.

Le tableau suivant réunit les équations de définition et les noms des unités pratiques adoptées par le Congrès de Genève.

GRANDEURS	ÉQUATIONS DE DÉFINITION	NOMS DES UNITÉS PRATIQUES
Intensité lumineuse	I	bougie décimale
Flux lumineux	$\Phi = I\omega$	lumen
Éclairement	$e = \Phi/\sigma = I/r^2$	lux ou lumen par m^2
Éclat	$\varepsilon = I/s$	bougie décimale par cm^2
Éclairage	$Q = \Phi t$	lumen-heure

Bases de la photométrie. — La lumière, en tant que phénomène essentiellement subjectif, ne peut se mesurer que par son impression sur la rétine. Les effets calorifiques ou chimiques des rayons lumineux permettent de déterminer l'énergie correspondante de ces rayons, mais non leur aptitude à l'éclairement qui constitue le but des sources lumineuses.

La photométrie a pour objet la détermination de l'intensité lumineuse d'un foyer, en fonction de celle d'un autre foyer pris comme étalon. L'œil juge très mal du rapport de deux

éclats ou de deux éclairements. D'après la loi psychophysique de Fechner, si l'excitation de la rétine croît en progression géométrique, la sensation n'augmente qu'en progression arithmétique. Il en résulte qu'on ne peut arriver à quelque exactitude dans les mesures qu'en ramenant l'opération à la constatation de l'égalité de deux éclairements.

Le plus souvent on éclaire deux écrans semblables, sous des incidences égales, par les deux sources à comparer et on modifie les distances de celles-ci aux écrans jusqu'à ce que les éclairements obtenus, considérés sous des angles égaux, paraissent identiques. Il est important d'employer des écrans blancs et non jaunâtres ou bleuâtres. Le plâtre pur ou le papier recouvert de blanc de Chine peut convenir. En vertu des relations précédemment établies on a, en appelant I et I' les intensités lumineuses, d et d' les distances,

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}.$$

Le rapport des intensités est donc égal au rapport des carrés des distances correspondantes.

Comme, en général, les distances des sources lumineuses aux écrans sont grandes relativement aux dimensions des foyers, on peut considérer les sources comme punctiformes, sauf lorsqu'elles sont entourées de globes diffuseurs de grande surface. On peut cependant négliger l'erreur résultant de la simple application de la loi des carrés si la distance vaut au moins dix fois la plus grande dimension du globe.

M. Broca a montré qu'on juge le mieux de l'égalité de deux éclairements quand ceux-ci sont voisins de 10 lux, l'œil de l'observateur étant à environ 30 cm des écrans examinés. Cette remarque renseigne sur la distance à laquelle il faut placer l'étalon du photomètre pour que ce dernier fournisse les résultats les plus précis. L'éclairement des écrans devrait être [illegible] avec les résultats des observations photométriques, afin de permettre d'apprécier les conditions dans lesquelles [illegible]

[illegible] dans les mesures photométriques, de ce

fait que les deux yeux ne subissent ordinairement pas à des degrés égaux les impressions lumineuses. Si l'on éclaire également les deux moitiés d'un écran translucide par des foyers identiques, séparés par une cloison et situés à la même distance de l'écran, et si l'on regarde chaque moitié avec un œil, ce qui peut se faire en prolongeant, en avant de l'écran, la cloison découpée suivant le profil de la figure, on juge en général que les deux moitiés sont inégalement éclairées. Pour éprouver avec les deux yeux la même impression lumineuse, il est nécessaire de reculer l'un des foyers jusqu'à réduire, souvent de plus de 1/10, l'éclairement correspondant. Il s'ensuit qu'il est indispensable dans les expériences de placer les deux yeux de manière qu'ils voient à la fois les deux plages éclairées et que les rayons leur arrivent de celles-ci sous des inclinaisons égales. Si ces conditions ne sont pas réalisables, il faut ne se servir que d'un œil pour l'observation, bien que la sensibilité soit alors notablement diminuée. Si les inclinaisons sont très peu différentes, on peut corriger l'erreur commise de ce chef en intervertissant les positions des foyers et en prenant des moyennes, ou, mieux encore, en utilisant une source lumineuse auxiliaire qu'on compare successivement à l'étalon et au foyer inconnu, suivant le principe de la double pesée.

Lorsque les yeux fixent pendant quelque temps des plages éclairées, ils éprouvent une fatigue qui diminue leur sensibilité. Pour saisir le mieux possible le moment où les éclairements des deux plages sont égaux, il faut déplacer rapidement l'un des foyers comparés et déterminer les positions limites pour lesquelles on perçoit une différence dans les éclairements. On adopte la position moyenne dans le calcul des intensités.

Malgré toutes les précautions indiquées, à savoir : éclairement des écrans d'environ 10 lux, vision binoculaire ou monoculaire des plages sous des incidences égales, distance de 30 cm entre les yeux et les écrans éclairés, à moins qu'on ne fasse usage de lunettes de visée, déplacement d'un des foyers de manière à laisser aux yeux toute leur sensibilité, il n'est pas rare de constater des différences de 0,7 à 1 pour 100

entre les résultats de divers observateurs, ce qui montre qu'en photométrie l'erreur personnelle a une influence plus grande que dans les mesures électriques. La photométrie tient, en effet, plus de la physiologie que de la physique, les phénomènes compliqués d'adaptation de l'œil faisant de celui-ci un instrument de mesure imparfait.

Dans ce qui précède nous avons supposé que les deux foyers comparés sont de même nature, c'est-à-dire de même teinte ou de même composition spectrale. Théoriquement la comparaison des éclairements n'est possible que dans ces conditions. S'il n'en est pas ainsi et si l'un des foyers est, par exemple, plus riche en rayons rouges, l'autre en rayons bleus, les éclairements ne sont plus comparables et la mesure devient affaire d'appréciation personnelle, où les phénomènes de daltonisme conduisent à des résultats très variables avec les observateurs, les yeux des diverses personnes étant différemment impressionnés par les couleurs.

De plus, la loi des carrés des distances ne s'applique pas rigoureusement à des foyers inégalement colorés. Ce fait, découvert par Purkinje, peut se démontrer de la manière suivante. Deux lampes à incandescence semblables éclairent deux écrans, l'une à travers un verre rouge, l'autre à travers un verre vert. On règle les distances des lampes de façon que les éclairements paraissent égaux. Si l'on réduit ou augmente les intensités des foyers dans la même proportion, en affaiblissant ou en accroissant le courant qui traverse les lampes, les deux éclairements sont jugés inégaux.

Comme le cas de la comparaison de foyers de teintes différentes, arc voltaïque et Carcel par exemple, se présente constamment dans la pratique, il est nécessaire de recourir à des artifices pour éviter de trop grandes inexactitudes dans les mesures.

Le procédé le plus rigoureux consiste à décomposer les faisceaux émis par les foyers à l'aide du prisme et à comparer séparément les rayons de même couleur; mais cette opération, qui fait l'objet de la spectrophotométrie, n'est pas appliquée par les praticiens à cause de sa complexité.

Le plus communément on se contente de faire exécuter plusieurs mesures par des observateurs différents et de prendre des moyennes. On a soin de déplacer brusquement l'un des foyers entre des positions limites qu'on resserre de plus en plus, car l'œil perçoit plus nettement l'égalité des éclairements quand les variations sont rapides que lorsqu'elles s'accomplissent lentement.

Si les teintes des lumières sont par trop différentes, on peut observer les écrans en clignant des yeux. Ce procédé, très employé par les peintres pour différencier les valeurs des éclairements, a pour effet de réduire la quantité de lumière qui entre dans les yeux et, par suite, d'éliminer la sensation colorée qui exige un certain degré d'excitation de la rétine.

Un autre moyen consiste à tracer, sur les écrans éclairés par les deux sources, une série de dessins décroissants et à faire varier les distances des foyers jusqu'à ce que le dessin le plus petit qu'on puisse percevoir ait la même grandeur sur les deux plages. L'approximation obtenue de cette manière dépend du nombre de dessins décroissants, ainsi que de l'acuité visuelle de l'observateur.

Enfin on peut se baser sur un phénomène découvert par M. Rood. L'œil cesse de distinguer les couleurs lorsqu'on lui présente alternativement et très rapidement des surfaces inégalement colorées. Si l'éclat de ces surfaces diffère, il persiste toutefois un scintillement, qui disparaît pour l'égalité des éclairements. Ce fait peut tenir à ce que la rétine est influencée plus lentement par la fréquence que par l'amplitude des vibrations lumineuses.

Méthodes photométriques. — La plupart des photomètres usuels sont basés sur la loi du carré des distances. Les deux moitiés d'un écran sont éclairées, par réflexion ou par transparence, sous des incidences égales par les deux sources à comparer. On déplace celles-ci jusqu'à ce que les éclairements qu'elles produisent soient égaux et l'on applique la formule

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}. \qquad (1)$$

En maintenant l'étalon à une distance invariable du photomètre, telle que l'éclairement soit de 10 lux, on peut graduer directement en bougies l'échelle suivant laquelle on déplace la lampe étudiée.

La mesure se fait souvent dans une chambre à parois d'un noir mat, afin d'éviter les reflets sur l'écran. Cependant on peut utiliser une chambre à parois claires et mates, à la condition de disposer autour des foyers des écrans noirs empêchant la dispersion des rayons. Le cube de la chambre doit être assez grand, parce que les étalons à flamme sont altérés par l'air vicié. Il convient d'établir une bonne ventilation, de se mettre à l'abri de la poussière et de maintenir la température aussi constante que possible. Il faut que, pendant les observations, les sources ne puissent pas être vues directement par l'expérimentateur. Celui-ci fait, à cet effet, usage d'une grande visière noire, recourbée sur les côtés et ne donnant accès qu'aux rayons issus de l'écran photométrique.

Lorsque les foyers à comparer sont très inégaux, on peut reculer l'un d'eux à une grande distance de l'écran, mais ce procédé n'est pas sans inconvénient, car il exige des couloirs photométriques étendus et les poussières flottant dans l'atmosphère du laboratoire absorbent une notable fraction du faisceau lumineux. On peut aussi rapprocher la lampe étalon de l'écran, mais il est à craindre que l'éclairement de ce dernier cesse d'être uniforme ou dépasse trop la valeur de 10 lux, avec laquelle la comparaison atteint la plus grande précision.

On tourne ces difficultés en employant une source lumineuse d'intensité intermédiaire, qu'on compare aux lampes étudiées. Comme étalons intermédiaires, on utilise de fortes lampes à incandescence.

La fig. 23 montre le plan d'une chambre noire A A, dans laquelle deux bancs photométriques P et P′ sont séparés par une cloison B. Les lumières à comparer sont disposées en L et en C, tandis que la source intermédiaire est placée en S. On peut ne se servir que d'un seul banc, en comparant successivement l'étalon et la lampe inconnue à la source auxiliaire,

ce qui élimine certaines erreurs, comme on l'a vu plus haut.

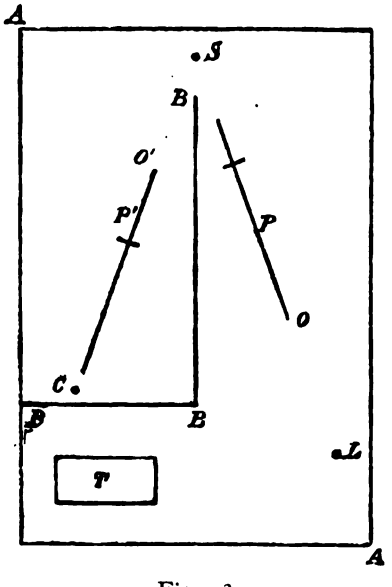


Fig. 23.

Une autre méthode, préconisée par MM. Ayrton et Perry, consiste à interposer, sur le faisceau émis par le foyer le plus intense, un diaphragme dans lequel se trouve une lentille divergente biconcave.

Si le foyer est à une distance l de la lentille, la divergence des rayons qui frappent l'écran est accrue comme si la source était au foyer conjugué et écartée de la lentille d'une distance l', telle que

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \qquad (2)$$

f étant la distance focale principale de la lentille. Par suite,

$$l' = \frac{lf}{l+f}.$$

Désignons par ρ le rayon du cercle éclairé sur l'écran lorsque le faisceau traverse le diaphragme sans lentille, et par ρ' le

rayon du cercle agrandi par l'introduction de la lentille dans le diaphragme. Le rayon de celui-ci étant r et sa distance à l'écran δ, on a

$$\frac{\rho}{r} = \frac{l + \delta}{l},$$

$$\frac{\rho'}{r} = \frac{l' + \delta}{l'};$$

d'où

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{l(l' + \delta)}{l'(l + \delta)}$$

et, en remplaçant l' par sa valeur,

$$\frac{\rho'}{\rho} = 1 + \frac{\delta l}{f(l + \delta)}.$$

Or les éclairements produits sans et avec interposition de la lentille sont dans le rapport

$$\left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2 = \left[1 + \frac{\delta l}{f(l + \delta)}\right]^2.$$

Il faut donc, dans l'expression de la loi du carré des distances, introduire, au lieu de la distance

$$d = l + \delta,$$

la distance virtuelle

$$d_1 = \frac{\rho'}{\rho}(l + \delta) = l + \delta + \frac{\delta l}{f}$$

ou, comme $l = d - \delta$,

$$d_1 = d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}.$$

La formule (1) devient alors

$$\frac{1}{1'} = \frac{\left[d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}\right]^2}{d^2}. \qquad (3)$$

La lentille exerce son plus grand effet quand $\delta = d/2$.

Pour déterminer la distance focale f, on emploie deux

sources identiques, telles que deux lampes à incandescence. On dispose la première lampe à la division o du banc photométrique, l'écran à la division d et la seconde lampe à la division $2d$ qui donne l'égalité des éclairements. On introduit ensuite la lentille à la division $d/2$. Il faut alors écarter la dernière lampe à une distance d' de l'écran pour revenir à l'égalité. En appliquant la formule (3), il vient

$$f = \frac{d^2}{4\,(d' - d)}.$$

Il est à remarquer que, dans les formules ci-dessus, on a négligé les réflexions à la surface de la lentille, qui dépassent souvent 5 pour 100 de la lumière incidente. Pour compenser cette perte, on place symétriquement, de l'autre côté du photomètre, une simple plaque de verre qui amène une perte sensiblement égale.

Photomètre Foucault. — Cet appareil comporte un écran en verre laiteux ou dépoli E, derrière lequel se placent les deux foyers à comparer A et B, séparés par une cloison C normale à l'écran et divisant l'angle BEA en parties égales. La cloison est légèrement écartée de l'écran, de manière que les plages lumineuses correspondant aux deux sources soient délimitées

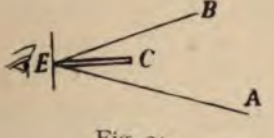


Fig. 24.

par une mince ligne d'ombre projetée par la cloison. On déplace l'un des foyers, suivant la direction du rayon incident, jusqu'à ce que les éclairements des deux moitiés de l'écran paraissent égaux pour l'œil placé, dans le prolongement de la ligne EC, à 30 cm de l'écran. On a soin d'observer les diverses précautions indiquées précédemment, pour réduire l'erreur d'observation au minimum. Il suffit alors d'appliquer la loi du carré des distances aux deux sources de lumière.

Photomètre Lambert et Rumford. — Dans le photomètre Lambert et Rumford, les deux foyers à comparer sont placés devant un écran blanc opaque, sur lequel une tige porte deux ombres A' et B', éclairées chacune par le foyer situé du même côté. On a soin de rendre égales les incidences des deux

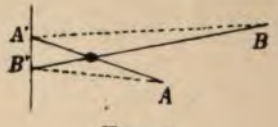


Fig. 25.

rayons A A' et B B', ce qui est facile si la tige est assez rapprochée de l'écran pour que les deux ombres se touchent. On déplace l'un des foyers jusqu'à ce que les ombres paraissent également éclairées et l'on applique la loi fondamentale aux distances A' B et A B'.

Photomètre Villarceau. — Sur une droite passant par les deux foyers à comparer on dispose un écran présentant deux faces blanches à angle droit, qui réfléchissent les faisceaux incidents vers l'observateur. Le réglage des distances a pour but d'égaliser les éclairements des deux faces. Ce photomètre,

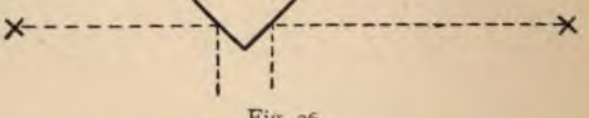


Fig. 26.

qui a été repris par MM. S. Thompson et Starling, peut, pour des mesures grossières, se réduire à une carte de visite pliée et tournée de façon que le plan bissecteur soit normal à la ligne des foyers.

Photomètre Bunsen. — Le photomètre Bunsen repose sur cette observation qu'une tache d'huile, faite sur une feuille de papier, paraît brillante si le papier est éclairé par transparence et sombre si le papier est éclairé par réflexion. Si la feuille reçoit des quantités de lumière égales sur les deux faces, la tache se confond avec le papier.

Si l'on dispose les deux foyers à comparer en A et B, fig. 27, la tache O semble disparaître lorsque les intensités lumineuses satisfont à la loi du carré des distances. Pour observer simultanément les deux faces de l'écran, on fait usage de miroirs

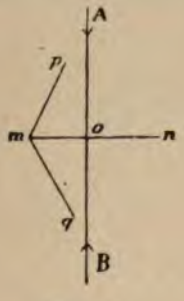


Fig. 27.

plans *mp* et *mq*, qui réfléchissent ces faces vers le spectateur. La disparition de la tache tient à ce que la somme des flux lumineux que le papier émet par transparence et par réflexion est égale au flux total correspondant que fournit la tache. Comme les coefficients de réflexion des deux faces de l'écran ne sont jamais identiques, la disparition de la maculature n'a pas lieu des deux côtés à la fois. On détermine par tâtonnements la position de l'écran entre les foyers pour laquelle la tache a la même apparence sur les deux faces du papier et l'on applique la loi du carré des distances à cette position. Si l'on veut une exactitude plus grande, on retourne l'écran pour recommencer l'opération et l'on prend la moyenne des résultats obtenus dans les deux mesures. Le photomètre et les sources lumineuses comparées se placent sur un banc divisé en centimètres de manière à renseigner les distances.

Pour préparer l'écran, on plonge un disque de laiton chauffé dans un bain de paraffine et l'on applique le disque sur une feuille de papier tendue. On fait ainsi un certain nombre de taches et on choisit la partie du papier qui contient la meilleure. On enlève l'excès de paraffine en étendant sur l'écran un papier buvard qu'on recouvre d'un fer légèrement chauffé. On peut substituer à cet écran deux feuilles de papier accolées,

dans lesquelles on a percé des trous correspondants et entre lesquelles se trouve une feuille de papier translucide qui remplace la maculature.

Photomètre Joly. — Deux lames parallélipipédiques de paraffine ou de verre laiteux sont séparées par une feuille de métal et disposées sur un banc photométrique entre les foyers à comparer, de manière que la surface de contact soit normale à la ligne qui joint ceux-ci. En faisant varier la distance de l'une des sources à l'appareil, on constate que l'une des lames devient alternativement plus claire et plus sombre que l'autre. L'égalité d'éclat des lames indique l'égalité de leurs éclairements. On fait une seconde mesure après avoir retourné l'écran, pour compenser l'inégalité éventuelle des deux lames.

La fig. 28 montre un photomètre construit par MM. Hartmann et Braun, dans lequel un écran de Joly peut glisser dans un canal entre deux lanternes où l'on place les deux lampes à incandescence à l'étude. Le canal est fermé par une bande

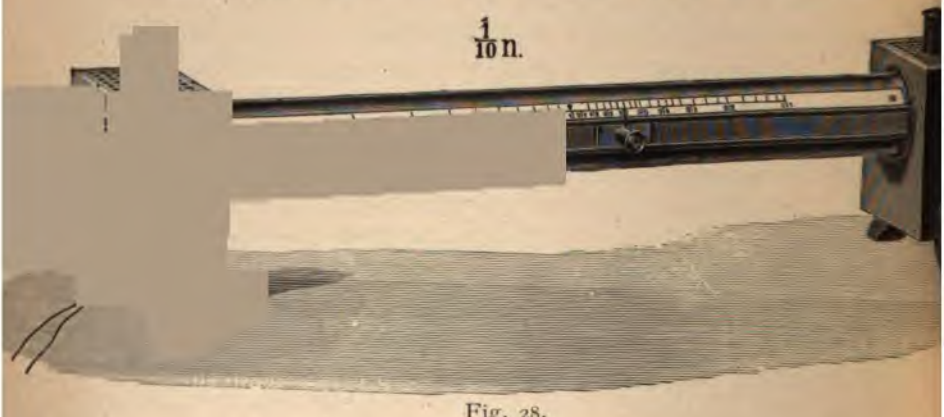


Fig. 28.

d'acier, qui s'enroule sur des barillets logés dans les cages extrêmes. Ce dispositif très simple permet de comparer les intensités horizontales de deux lampes, dont l'une sert d'étalon, sans qu'il soit nécessaire de se placer dans une chambre noire.

Photomètre Lummer et Brodhun. — L'appareil renferme

deux prismes à réflexion totale M et N, fig. 29. Le premier présente une face sphérique dans laquelle on a usé un plan circulaire appuyé, par l'intermédiaire de baume de Canada, sur la face hypothénuse plane du second. Un écran en gypse E est éclairé normalement sur ses deux faces par les foyers

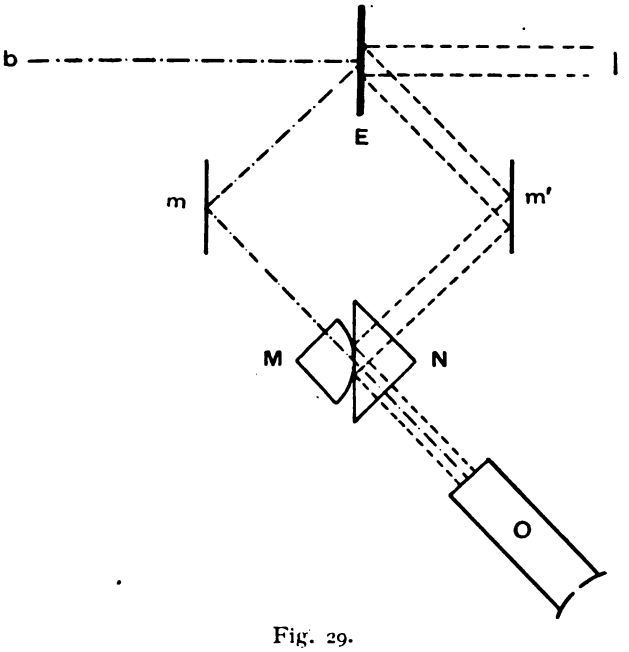


Fig. 29.

à comparer *b* et *l*. Les rayons émis par la face gauche arrivent, après réflexion sur le miroir *m*, dans le prisme M ; une partie traverse, sans réflexion ni réfraction, la surface de séparation des deux prismes et vient frapper l'œil placé devant l'oculaire O. L'observateur perçoit ainsi, sous forme d'une plage elliptique, une partie de la face gauche de l'écran. En même temps, l'œil distingue un champ lumineux entourant le précédent et provenant de la lumière émise par la face droite de l'écran, lumière réfléchie sur le miroir *m'* et dont une partie subit la réflexion totale sur la face hypothénuse du prisme N, là où celui-ci n'est pas en contact avec le prisme M. On taille aussi les prismes de manière à accoler deux plages semi-circulaires.

On règle les distances des foyers à l'écran jusqu'à obtenir l'égalité d'éclairement des deux champs. L'instrument permet le retournement de l'écran, pour éliminer l'influence de l'inégalité des faces de celui-ci. C'est parmi les photomètres connus l'un des plus sensibles.

Photomètre Whitman. — Les photomètres ci-dessus ne sont corrects qu'avec des lumières isochromatiques. Pour comparer des foyers hétérochromatiques, M. Whitman a imaginé le dispositif suivant, basé sur la propriété découverte par M. Rood, page 77.

Les sources I et I' éclairent respectivement un écran A et un écran B, ce dernier étant découpé suivant une croix de Malte dont les pleins égalent les vides et tournant autour d'un axe BB' à la vitesse de 3 tours environ par seconde. On règle la position des lampes jusqu'à ce que l'œil ne perçoive plus de variations d'éclat en regardant les écrans. Avec cet

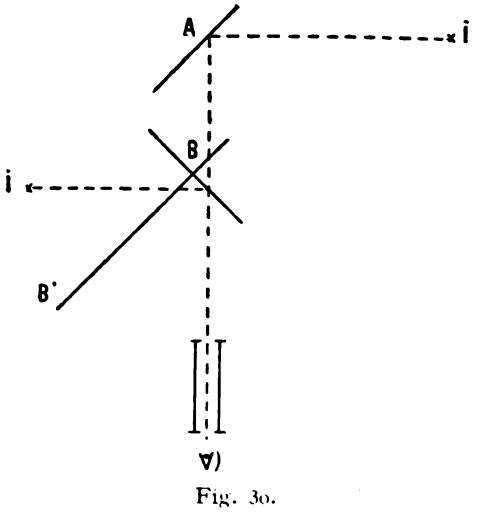


Fig. 30.

appareil on arrive à comparer directement un arc voltaïque à l'étalon Hefner, tandis qu'avec les photomètres ordinaires on est obligé de faire intervenir un étalon intermédiaire, d'éclat moyen, pour faciliter les mesures.

Intensité moyenne sphérique. Photomètre Rousseau. — L'intensité lumineuse d'un foyer n'est pas la même dans toutes les directions. La flamme d'une bougie, par exemple, émet des rayons plus intenses dans les directions horizontales que dans les directions obliques par rapport à l'horizon. Or la valeur d'un foyer dépend, dans certaines circonstances, de l'éclairement moyen qu'il peut produire, de sorte qu'il est intéressant d'évaluer l'intensité lumineuse, rapportée à l'étalon, non seulement suivant une direction horizontale, mais encore dans les divers azimuts et sous les diverses inclinaisons, l'intensité de la lampe étalon étant considérée suivant une direction invariable.

On arrive à ce résultat en plaçant l'écran photométrique de manière qu'il soit frappé sous des incidences égales par les rayons émanant des deux lumières à comparer, quelle que soit la position du foyer étudié. On construit, à cet effet, des photomètres Bunsen, fig. 31, mobiles autour d'un axe *m* et portant en saillie des boutons *a* et *b*, dont les ombres se superposent sur l'écran lorsque celui-ci est orienté suivant la bissectrice des faisceaux incidents.

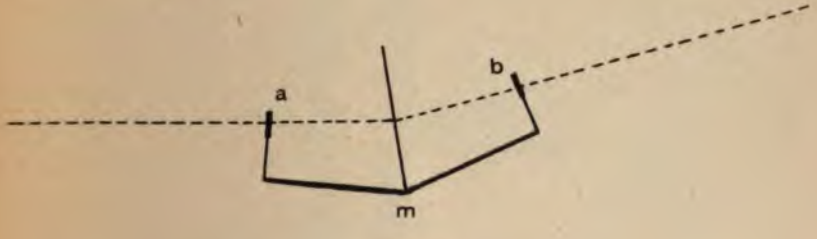


Fig. 31.

Un moyen indirect, qui permet d'utiliser les photomètres ordinaires, consiste à disposer sur le banc photométrique un miroir mobile, susceptible de renvoyer vers l'écran le flux lumineux qu'il reçoit de la lampe essayée, quel que soit l'angle de ce flux avec l'horizontale. On compare l'éclairement de l'écran par le faisceau réfléchi à l'éclairement dû à la lampe étalon, pour diverses positions de la lampe à l'essai. On note l'inclinaison des rayons reçus sur l'écran, ainsi que leur parcours

total, et l'on applique la loi du carré des distances, en tenant compte du coefficient d'absorption du miroir, qui est à peu près indépendant de l'incidence.

On maintient la distance de la lampe au miroir constante, pour ne pas avoir à la mesurer à chaque expérience. On utilise, dans ce but, le procédé suivant, fig. 32. La lampe F est suspendue à l'une des extrémités d'un levier BA pivotant sur

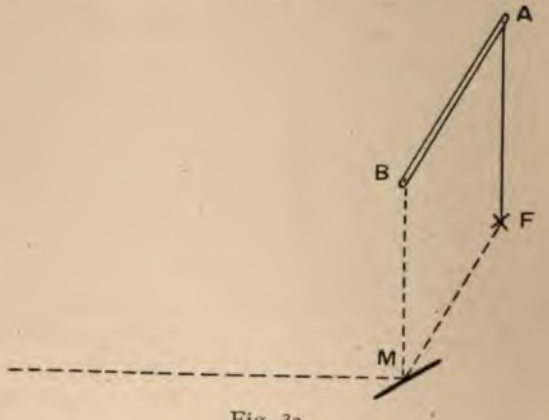


Fig. 32.

une genouillère à l'autre extrémité située sur la verticale passant par le miroir M. La distance de l'axe de rotation B au miroir est égale à la longueur de la corde qui soutient le foyer. Dans ces conditions, quelle que soit la position donnée au foyer, l'écartement de celui-ci au miroir reste constant et égal à AB.

Pour déterminer le coefficient d'absorption du miroir, on compare à un étalon une autre lampe placée d'abord sur la même ligne que l'étalon et le photomètre, le miroir étant enlevé. On place ensuite la lampe de façon que les mêmes rayons, arrivant normalement au banc photométrique, soient réfléchis par le miroir disposé à 45°. Soient l et l' les distances parcourues par le faisceau incident de la lampe, pour une même position de l'étalon. En appelant I l'intensité considérée de la lampe et k le coefficient d'absorption, on a

$$\frac{I(1-k)}{I} = \frac{l'^2}{l^2};$$

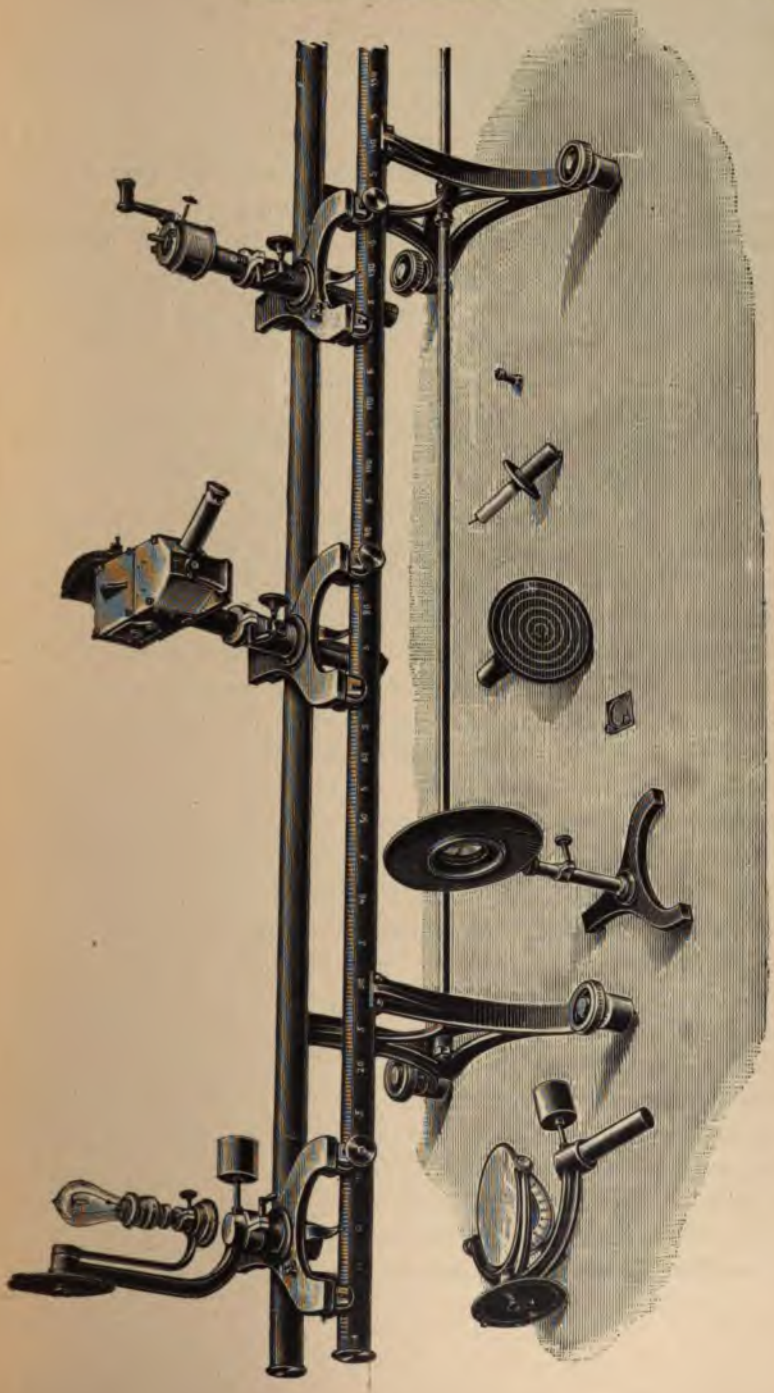


Fig. 33.

d'où

$$k = 1 - \frac{l'^2}{l^2}.$$

Ce coefficient varie de 0,6 à 0,9 suivant la nature des miroirs.

La fig. 33 montre un banc photométrique pourvu d'un appareil Lummer et Brodhun, d'une lampe étalon Hefner et d'une lampe à incandescence. Sous celle-ci se voit le miroir destiné à renvoyer vers le photomètre les rayons inclinés d'un foyer lumineux. Sur le sol figurent divers accessoires, entr'autres une lentille utilisée à la diffusion des faisceaux trop intenses.

Les méthodes ci-dessus exigent que la lampe essayée rayonne d'une manière invariable pendant les mesures successives, sinon les résultats obtenus ne sont pas comparables entr'eux. Or la lumière des lampes à arc, auxquelles on applique particulièrement ce mode d'investigation, est instable. M. Rousseau a admis que, lors des variations de l'arc, les intensités dans les différentes directions conservent les mêmes valeurs relatives, et il a réalisé un photomètre à l'aide duquel on compare les intensités lumineuses d'un foyer correspondant aux divers angles à l'intensité des rayons émis par la même lampe dans une direction déterminée, telle que celle d'intensité maxima.

La lampe est suspendue derrière un disque opaque présentant sur sa face antérieure une graduation en 360 degrés. Autour du disque se meuvent deux alidades radiales, munies de miroirs N et M, ainsi que de tiges métalliques *n* et *m*, destinées à porter ombre sur un écran DC. Ce dernier est fixé normalement à une coulisse H, que deux tringles articulées KH et IH maintiennent suivant la bissectrice de l'angle des alidades. Dans le cas de lampes à arc voltaïque alimentées par un courant continu, l'une des alidades est disposée suivant la direction à 45° sous l'horizontale, l'autre suivant la direction à laquelle correspond l'intensité relative cherchée. On tourne les miroirs N et M, articulés sur des genouillères, de manière qu'ils réfléchissent la lumière du foyer sur l'écran DC. Les angles d'incidence des rayons sur l'écran sont égaux par le fait

de la disposition adoptée. Les tiges *n* et *m* projettent deux ombres sur l'écran ; l'ombre correspondant à un des faisceaux est éclairée par l'autre faisceau. On déplace les miroirs sur les alidades jusqu'à ce que les ombres paraissent de même intensité. Si *d* et *d'* représentent le double des distances de chacun

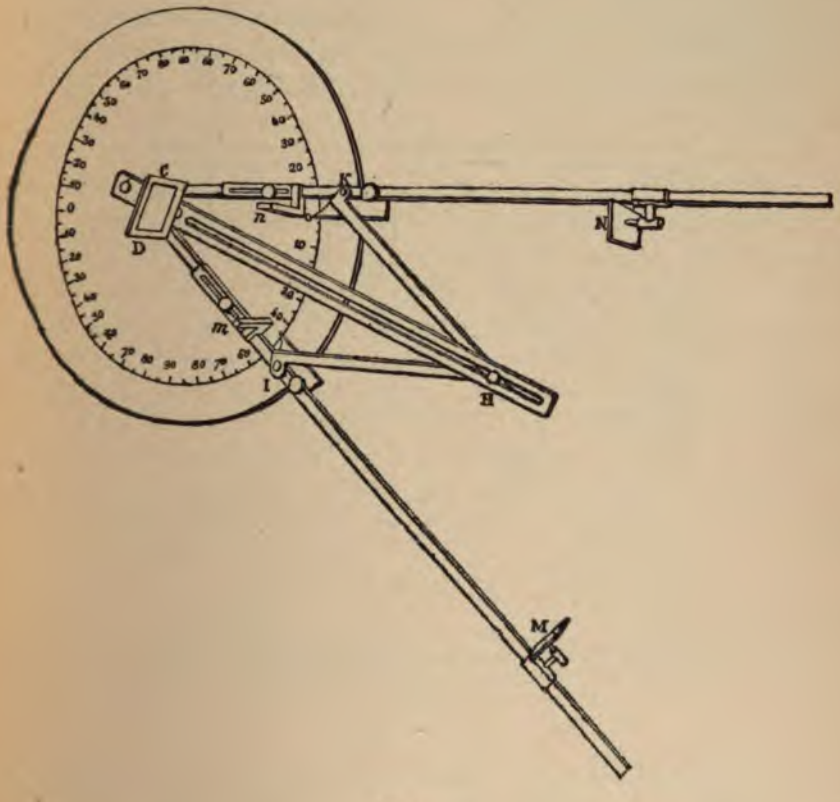


Fig. 34.

des miroirs à l'écran, on a alors, en appelant I et I' les intensités des rayons comparés,

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Lorsqu'on étudie une lampe à arc à l'aide de cet appareil,

les deux ombres ont des teintes différentes, alors même que les miroirs sont identiques. Cela tient à ce que la composition spectrale de la lumière n'est pas la même sous les diverses inclinaisons, par suite de l'hétérogénéité des parties éclairantes du foyer.

La comparaison, dans une direction unique, de la lampe étudiée avec un étalon lumineux fournit les valeurs absolues de l'intensité suivant les diverses directions.

Si l'on porte à partir d'un point A, fig. 35, suivant les diffé-

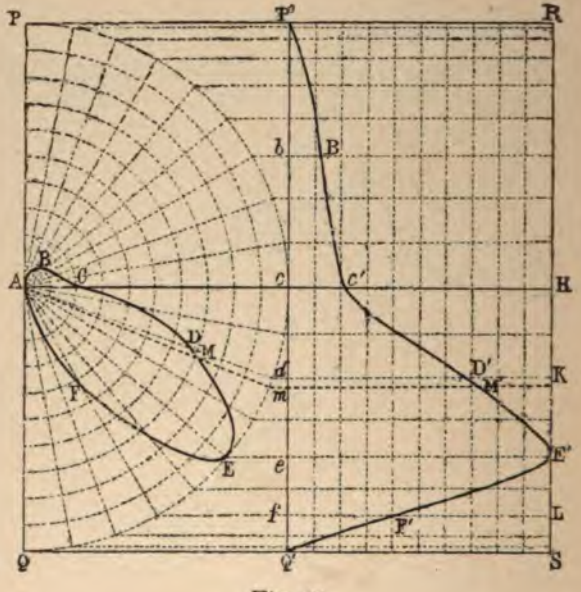


Fig. 35.

rentes directions prises dans un azimut, des longueurs proportionnelles aux intensités lumineuses correspondant à ces directions, l'intensité maxima AE étant représentée par l'unité de longueur, on trouve, pour un arc voltaïque à courant continu, une courbe telle que ABCDEF. Pour une lampe rayonnant également dans les divers azimuts, la surface obtenue en traçant des longueurs semblables dans toutes les directions autour du point A est une surface de révolution, dont la courbe figurée est une section méridienne.

On appelle *intensité moyenne sphérique* d'un foyer la moyenne des intensités considérées tout autour de celui-ci ou encore le rapport du flux lumineux total à 4π.

M. Rousseau représente la répartition de l'éclairage comme le montre le côté droit de la fig. 35. Des longueurs proportionnelles aux diverses intensités sont portées, normalement à une droite P'Q', sur les abscisses correspondant aux extrémités des rayons de la circonférence de centre A.

On peut démontrer que l'intensité moyenne sphérique est à l'intensité maxima AE comme la surface P'B'C'D'E'F'Q' est à l'aire du rectangle P'RSQ'. Soit, en effet, I l'intensité suivant une direction AD faisant un angle α avec l'horizontale. La zone sphérique élémentaire limitée par deux rayons infiniment voisins AD et AM a une surface $2\pi \cos\alpha\, d\alpha$, si le rayon de la sphère est l'unité. Le flux de lumière qu'elle reçoit vaut $2\pi I \cos\alpha\, d\alpha$. L'intensité lumineuse moyenne dans une zone correspondant à deux rayons AD et AF, dont les angles avec l'horizontale sont α et α', s'obtient en divisant le flux

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} 2\pi I \cos\alpha\, d\alpha$$

par l'angle solide

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} 2\pi \cos\alpha\, d\alpha = 2\pi (\sin\alpha' - \sin\alpha)$$

qui le contient. Or, d'après la construction de la figure, la surface dD'E'F'f représente l'intégrale

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} I \cos\alpha\, d\alpha$$

et le rectangle dKLf, qui a pour hauteur l'unité, est mesuré par sa base

$$df = \sin\alpha' - \sin\alpha.$$

L'intensité moyenne considérée est donc proportionnelle au rapport

$$\frac{\text{surf. } d\text{D'E'F'}f}{\text{surf. } d\text{KL}f}.$$

Pour calculer l'intensité moyenne sphérique en fonction de l'intensité maxima, il suffit de diviser l'aire curviligne totale par l'aire rectangulaire qui la circonscrit, en évaluant ces surfaces au moyen du planimètre.

Pour les lampes à arc à courant continu l'on mesure les intensités lumineuses de 10° en 10° sous l'horizon et de 30° en 30° au-dessus. M. Rousseau a reconnu, en ce qui concerne ces lampes, que l'intensité horizontale n'est pas la même dans les divers azimuts, par suite de l'obliquité que présente fréquemment le cratère; mais l'intensité maxima, correspondant à un angle d'environ 45° sous l'horizon, est approximativement constante dans tous les plans verticaux passant par le foyer.

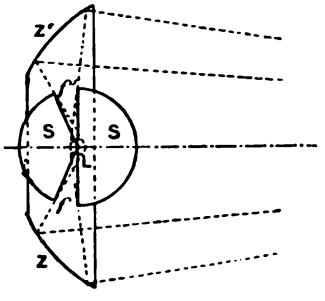


Fig. 36.

Le flux lumineux total émis par une source est le produit de 4π par l'intensité moyenne sphérique. Une lampe d'une intensité moyenne sphérique de 300 bougies décimales fournit 3770 lumens.

Lumen-mètres Blondel. — L'intensité moyenne sphérique d'un foyer ayant pour expression le quotient du flux lumineux total émis par 4π, une méthode de mesure de ce flux donne indirectement l'intensité cherchée.

M. Blondel a imaginé de concentrer sur un écran diffuseur une fraction déterminée du flux rayonné par la lampe à l'essai. A cet effet, celle-ci est disposée au centre d'une sphère opaque SS, noircie intérieurement et percée de deux ouvertures *f e* en forme de fuseau, fig. 36. Les rayons lumineux sortant par

fenêtres frappent un miroir concave ZZ', qui les réfléchit sur l'écran en une image brillante de petites dimensions, qu'on photomètre par les méthodes ordinaires. Le flux traversant les fuseaux représente un dixième du flux total d'un foyer éclairant également dans tous les azimuts. L'appareil, étalonné à l'aide d'une lampe étudiée, au préalable, par le procédé de M. Rousseau, permet de déduire l'intensité moyenne sphérique d'une seule mesure. Avec les sources de lumière dissymétriques, il faut répéter l'expérience en les faisant tourner au centre de la sphère.

Un modèle de lumen-mètre plus simple consiste en une sphère opaque, blanchie intérieurement par un enduit diffusant à base de silicate et de craie. Dans un globe ainsi préparé, une source lumineuse détermine un éclairement uniforme de la paroi, proportionnel au flux total émis. On peut donc comparer les flux rayonnés par deux lampes introduites successivement dans l'appareil et, par suite, obtenir le rapport de leurs intensités moyennes sphériques, en photométrant la lumière que transmet une petite fenêtre en verre opale, ménagée dans la sphère. Il n'est pas nécessaire que les foyers lumineux soient placés au centre de cette dernière, mais il est important d'empêcher, par l'interposition d'un écran blanc aussi restreint que possible, les rayons de frapper directement la plage translucide.

Pour évaluer l'intensité moyenne hémisphérique de foyers punctiformes, on a proposé de disposer ceux-ci immédiatement en dessous du plan de base d'une calotte peinte en noir mat à la partie supérieure de la sphère.

Photomètre intégrateur Matthews. — Dans ce dispositif, 12 miroirs, fixés à la périphérie d'un disque, reçoivent du foyer des rayons sous diverses inclinaisons et les renvoient vers un photomètre du genre Lummer et Brodhun. On procède à l'étalonnage comme pour les lumen-mètres Blondel.

Courbes d'éclairement. — Les méthodes photométriques étudiées précédemment ne s'appliquent pas à la détermination

de la répartition de l'éclairement fourni par un foyer dans une salle ou un espace découvert.

Dans le dernier cas, le calcul permet d'arriver à la solution, lorsqu'on connaît l'intensité des rayons émis par les foyers éclairants suivant les diverses directions et qu'il n'existe aucune paroi réfléchissante ou diffusante. Ainsi, l'éclairement produit par un faisceau lumineux d'une intensité de I bougies décimales sur une surface distante de r mètres est, en appelant α l'angle d'incidence,

$$\frac{I \cos \alpha}{r^2} \text{ lux.}$$

Supposons qu'on ait calculé, d'après cette formule, la répartition sur un plan horizontal de l'éclairement fourni par un foyer. On pourra représenter la distribution de la lumière dans un plan vertical passant par la lampe, en prenant comme abscisses les distances au pied du foyer et comme ordonnées les valeurs de l'éclairement. S'il y a plusieurs lampes en ligne droite, on construira la courbe d'éclairement de chaque foyer et, en additionnant les ordonnées correspondant à une même abscisse, on obtiendra celles de la courbe figurant l'éclairement résultant.

Voici un autre procédé graphique, emprunté au système des projections cotées et applicable à des foyers distribués d'une manière quelconque au-dessus du plan horizontal, par exemple aux réverbères éclairant une place publique. Sur un plan de la surface éclairée l'on indique la position des sources lumineuses et l'on trace autour de celles-ci des circonférences concentriques représentant les lieux des points d'égal éclairement relatifs aux foyers considérés isolément. En additionnant, en un nombre suffisant de points, les cotes d'éclairement qui concernent les diverses lampes, il est possible de tracer les courbes d'égal éclairement se rapportant à l'ensemble des foyers.

Ces procédés ne sont pas exacts quand il existe des surfaces réfléchissantes, dans une salle par exemple. Il faut alors recourir à la mesure directe de l'éclairement.

Pour évaluer l'éclairement moyen d'une surface horizon-

tale éclairée par des lampes à arc, on photomètre un des foyers et on détermine le flux qu'il envoie sous l'horizon, en planimétrant la partie correspondante de la courbe de Rousseau. Le produit de ce flux exprimé en lumens par le nombre de lampes, divisé par la surface en m², donne l'éclairement moyen en lux.

Photomètre L. Weber. — Le photomètre suivant, fig. 37 et 38, permet de mesurer directement l'éclairement d'une surface. L'appareil comprend deux tubes A et B noircis intérieurement. Le premier est fixé horizontalement sur un pied; le

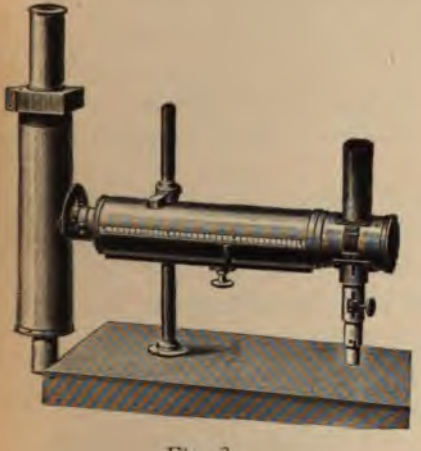


Fig. 37.

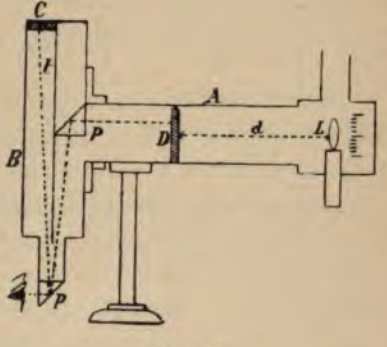


Fig. 38.

second est mobile autour de l'axe du premier et peut être incliné dans toutes les directions par rapport à l'horizon. Le tube A se termine par une lanterne pourvue d'une lampe de comparaison L, laquelle envoie un faisceau lumineux divergent sur une plaque laiteuse D qu'on peut mouvoir, suivant l'axe du tube, à l'aide d'une crémaillère et d'un bouton extérieur. La hauteur de la flamme de la lampe se lit, sur une échelle, à travers une fenêtre allongée, percée dans la paroi de la lanterne. Le tube B, fermé par une plaque laiteuse C, est divisé en deux parties par une cloison *t*. La plaque C est disposée suivant le plan où l'on veut connaître l'éclairement, par exemple dans

le plan horizontal, comme l'indiquent les figures. En regardant par l'orifice p, directement ou par réflexion dans un prisme, on distingue la plaque C, qu'éclaire par transparence la lumière d'un foyer ou la lumière diffuse; à côté l'on voit, par réflexion totale dans un prisme P, la plaque D éclairée par transparence par la lampe de comparaison. On peut aussi adopter un dispositif de prismes analogue à celui du photomètre Lummer et Brodhun, pour obtenir deux plages lumineuses concentriques. En faisant varier la position de la plaque D, il arrive un moment où les plaques C et D se détachent avec la même netteté, ce qui correspond à des éclairements égaux. Or, l'éclairement de la plaque D est I/d^2, en appelant d sa distance à la lampe de comparaison, d'intensité égale à I. La longueur d est toujours suffisante pour qu'on ne commette pas d'erreur sensible en admettant que l'éclairement de la plaque D est uniforme. L'éclairement de la plaque C est donc exprimé également par I/d^2.

Pour déterminer I, on vise avec le tube mobile une lampe étalon, placée à une distance déterminée de la plaque C, et l'on cherche la position correspondante de la plaque D.

Lorsque les lumières à comparer sont très inégales, on peut employer des plaques plus ou moins absorbantes, qu'on a soin de tarer comme ci-dessus, en plaçant devant le tube B, à une distance connue, un foyer étalon.

L'appareil de Weber permet de photométrer les foyers de grandes dimensions, tels que les lampes à arc pourvues de globes diffusants, qui s'étudient difficilement avec quelques-uns des photomètres décrits plus haut. A cet effet, on oriente le tube B vers le foyer, de manière que la plaque terminale soit frappée directement par les rayons émanant de la source.

On peut aussi mesurer les éclairements en enlevant la plaque laiteuse C et en visant normalement un écran blanc placé dans le plan dont on cherche l'éclairement. On étalonne alors l'instrument en éclairant l'écran par une source lumineuse connue située à une distance déterminée, par exemple par une bougie décimale disposée à un mètre, ce qui procure un éclairement d'un lux.

Si les lumières sont de colorations très différentes, il est difficile de comparer les éclairements des deux plaques. On a alors quelquefois recours à l'artifice suivant.

On commence par remplacer les plaques laiteuses C et D par des plaques en verre dépoli portant des dessins décroissants. On place une lampe étalon d'intensité I' à une distance l de C et l'on cherche la distance d dont il faut éloigner D de la lampe de l'appareil pour voir un même dessin avec la même netteté. Les éclairements I'/l^2 et I/d^2 sont alors égaux.

Si l'on remet ensuite les plaques laiteuses et si l'on regarde à travers un verre rouge, les deux éclairements ne semblent plus égaux : il faut donner à D une position d' pour rétablir l'équilibre. L'intensité de l'étalon n'a plus pour expression $I l^2/d^2$, mais

$$\frac{I\,l^2}{d'^2} = \frac{1}{K}\,\frac{I\,l^2}{d^2}.$$

On tire de là la constante K par laquelle il faut multiplier l'intensité trouvée avec le verre rouge pour obtenir l'intensité réelle.

Photomètre Mascart. — M. Mascart a imaginé un photomètre pour la mesure des éclairements, dans lequel le réglage, au lieu de se faire par le déplacement d'une plaque laiteuse, comme dans l'appareil précédent, s'opère par l'obturation plus ou moins complète d'une fenêtre traversée par le faisceau lumineux émis à travers la plaque laiteuse, fig. 39.

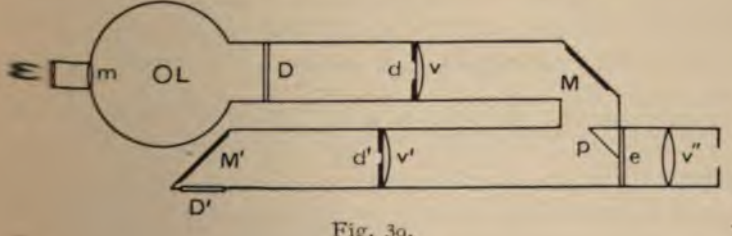


Fig. 39.

La lampe de comparaison L, dont la hauteur de flamme se lit à l'aide de l'image projetée par une lentille m sur une échelle ε, envoie un flux lumineux sur une plaque laiteuse D.

4146

Les rayons transmis par celle-ci traversent le diaphragme réglable d fixé contre une lentille v; réfléchis par un miroir M et un prisme p, ils viennent éclairer une partie de l'écran e. Ce dernier est vu nettement par l'œil, grâce à la lentille v'' qui sert à la mise au point. Une seconde plaque laiteuse D', frappée normalement par la lumière de la lampe étalon ou disposée suivant la surface dont on cherche l'éclairement, transmet un faisceau lumineux, réfléchi par le miroir M', à travers le diaphragme d' et la lentille v' sur l'autre moitié de l'écran e.

On règle l'égalité des éclats des deux plages lumineuses formées sur l'écran, en modifiant les ouvertures des diaphragmes d et d'. Les éclats des deux plages peuvent être considérés comme proportionnels aux ouvertures des diaphragmes, lesquelles sont indiquées sur de petites graduations portées par les vis de réglage, la hauteur des fenêtres restant invariable.

Pour étalonner l'instrument, on dispose une lampe étalon à une distance déterminée de l'écran D', les rayons lumineux tombant normalement sur celui-ci. L'éclairement Q ainsi réalisé est connu. On cherche les ouvertures l et l' de d et d' qui donnent l'égalité d'éclat des images de D et D' sur e. En appelant P l'éclairement comparé à Q, on a

$$\frac{P}{Q} = \frac{l'}{l}$$

ou

$$P = Q\,\frac{l'}{l}.$$

Dans un modèle portatif du photomètre Mascart, les diaphragmes sont constitués par des disques percés de trous décroissants. On fait ainsi varier l'éclat des plages de l'écran par soubresauts, ce qui facilite le réglage.

Appareil Houston et Kennely. — Ce photomètre permet d'apprécier rapidement, d'une manière approximative, l'éclairement en un point d'une salle ou d'un espace découvert illuminé par un nombre quelconque de foyers.

Une petite chambre noire est éclairée par une fenêtre F formée d'une glace laiteuse, fig. 40. En face de celle-ci se

trouve un plan E portant des caractères imprimés, qu'on regarde à l'aide d'une lunette L, à tirage pour la mise au point. La fenêtre F est placée à l'endroit où l'on désire connaître l'éclairement. Au moyen d'un pignon p et d'une crémaillère on fait glisser un volet v, pour réduire l'ouverture de la

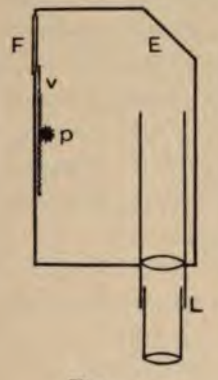


Fig. 40.

fenêtre jusqu'à la dernière limite de la vision distincte des caractères. Le volet présente une graduation qui indique l'éclairement de la glace F.

Cette graduation est obtenue en plaçant l'appareil, dans une salle photométrique, devant un foyer étalon et en déterminant les positions du volet correspondant à différentes distances du foyer à la fenêtre.

L'erreur moyenne des mesures peut atteindre 10 pour 100, mais l'instrument a l'avantage de ne pas exiger un étalon portatif et de permettre des observations rapides d'une approximation suffisante pour beaucoup d'applications.

Rendement lumineux des lampes à incandescence. — On évalue l'intensité horizontale moyenne d'une lampe à incandescence en prenant la moyenne des lectures horizontales relevées dans des azimuts différant de 22°,5 ou 45°. Le rapport entre l'intensité horizontale moyenne et l'intensité horizontale mesurée dans le plan du filament est, en général, voisin de 1,1. On adopte très souvent la moyenne horizontale comme terme de comparaison, afin d'abréger les essais. Cette manière de

faire est légalisée en Angleterre. Elle concorde d'ailleurs avec la pratique suivie pour les foyers à flamme.

Si l'on veut avoir l'intensité moyenne sphérique, on cherche, dans divers azimuts, la variation de l'intensité lumineuse suivant des rayons inclinés sur l'horizon. L'expérience montre que les courbes figurant la répartition de la lumière suivant les diverses sections horizontales faites dans la sphère d'éclairement sont semblables entr'elles et, par suite, semblables à la courbe obtenue dans le plan horizontal passant par le centre de figure de la lampe. Il suffit donc de déterminer la variation de l'intensité lumineuse dans un plan vertical et dans un plan horizontal passant par le centre pour pouvoir calculer l'intensité moyenne sphérique.

Pour ces mesures on se sert d'un des photomètres décrits précédemment. Les essais sont facilités par la propriété que possèdent les lampes à incandescence de pouvoir fonctionner dans une position quelconque. On monte le foyer sur un support mobile autour d'un axe vertical, ce qui permet les observations propres à l'estimation de la moyenne horizontale. Les positions successives de la lampe sont repérées par un index sur une graduation. En vue de la détermination de l'intensité moyenne sphérique, le système peut en outre tourner autour d'un axe horizontal passant par le centre de la lampe et une seconde graduation repère les positions correspondantes de celle-ci.

Il est commode d'employer, comme étalon secondaire pour les mesures de l'espèce, une lampe à incandescence à filament droit, graduée au préalable.

Pour obtenir rapidement l'intensité horizontale moyenne, M. Crova a suggéré l'idée de faire tourner la lampe autour de son axe vertical, à la vitesse de 3 tours par seconde, pendant qu'elle est sur le banc photométrique.

L'intensité lumineuse des lampes à incandescence varie essentiellement avec la puissance qu'elles absorbent. Elle peut être représentée approximativement, d'après M. Voit, par la fonction

$$I = \alpha w^3,$$

dans laquelle I est exprimé en bougies décimales et w en watts. Le coefficient α dépend de la nature du filament et particulièrement de sa surface.

D'après la formule précédente, l'erreur relative qu'on peut commettre dans la mesure de l'intensité lumineuse est triple de celle qu'entraîne la détermination de la puissance électrique. Par suite, si les observations photométriques sont faites à 1 pour 100 près, il faut, pour qu'il y ait équivalence, que la puissance soit évaluée avec une approximation de $^1/_3$ pour 100. Comme la mesure de la puissance comporte des lectures au voltmètre et à l'ampèremètre, et comme les erreurs auxquelles exposent ces lectures peuvent s'ajouter, il y a lieu d'employer des instruments, tels que le potentiomètre, suffisamment précis pour ne pas occasionner d'erreurs supérieures à 0,16 pour 100. On n'arrive à une telle exactitude que si la source de courant est très constante; des accumulateurs très peu poussés sont seuls susceptibles de satisfaire à cette exigence.

Pour apprécier une fabrication de lampes à incandescence, il est nécessaire d'examiner comment la puissance électrique consommée par bougie varie avec le temps de fonctionnement des foyers. En outre, il faut se rendre compte de l'uniformité de ceux-ci. Dans ce but, on fait acheter, par un intermédiaire, une centaine de lampes de même valeur nominale. On mesure le nombre de watts absorbés par chacune d'elles pour l'obtention de l'intensité lumineuse normale, disons 16 bougies. On pointe chaque foyer sur un diagramme, en prenant comme abscisse le nombre total de watts et comme ordonnée le nombre de watts par bougie. On exige aux États-Unis que les points figuratifs de 90 pour 100 des lampes tombent dans un rectangle dont la base correspond à 6 watts et la hauteur à 3 watts par bougie.

Dans ces dernières années on a imaginé diverses lampes à filament métallique, dont quelques-unes seulement ont reçu la sanction de la pratique. Nous réunissons page 104 en un tableau les résultats comparatifs publiés sur ces foyers.

NATURE DU FILAMENT	PUISSANCE ABSORBÉE EN WATTS	DURÉE EN HEURES	CONSOMMATION MOYENNE EN WATTS PAR BOUGIE DÉCIMALE HORIZONTALE
Charbon	87,5	750	3,9
Tantale	44	1500	1,95
Osmium	37,5	2000	1,67
Zircone-charbon	43	550	1,91
Tungstène	12,5	1000	1,11
Tungstène-osmium	31,2	1000	1,2

Des essais effectués sur des lampes Nernst, à bâtonnet d'oxydes réfractaires disposé horizontalement dans un globe opale, ont accusé une consommation spécifique égale au début à 1,5 watt par bougie décimale suivant la direction verticale, et croissant progressivement avec la durée d'allumage jusqu'à 3,5 watts par bougie après 700 heures.

Rendement lumineux des lampes à arc voltaïque. — La lumière émise par une lampe à arc ne présente pas tout à fait la même distribution dans les divers azimuts, à cause des déplacements du cratère, de sorte que la surface photométrique n'est pas de révolution. Pour des essais de grande précision, il convient de déterminer simultanément, au moins pour des azimuts à 180°, les courbes de répartition de l'intensité lumineuse. Cependant, les intensités maxima n'offrent pas

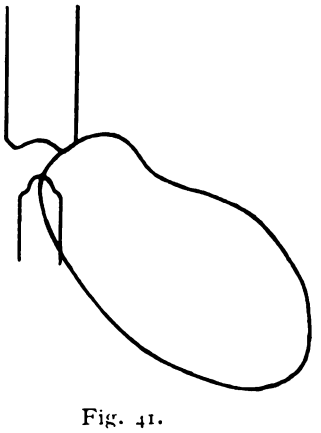


Fig. 41.

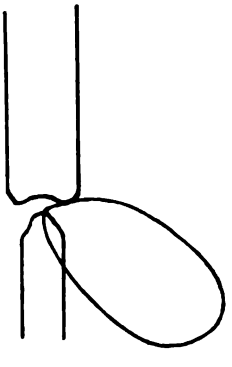


Fig. 42.

de différences sensibles. C'est pourquoi l'on se contente généralement de rechercher la distribution des rayons dans un seul azimut pour faire le calcul de l'intensité moyenne sphérique.

On se rappelle la méthode employée par M. Rousseau pour la représentation graphique des résultats. Les courbes obtenues pour les lampes à arc à courant continu montrent que les intensités sont assez faibles dans l'hémisphère supérieure, surtout avec les petits arcs, fig. 41 et 42.

En pratique, pour abréger les mesures, on admet souvent que l'intensité moyenne sphérique S d'un arc à courant continu est donnée par la formule suivante, dans laquelle H représente l'intensité horizontale et M l'intensité maxima à 45° sous l'horizon,

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}.$$

D'autre part, on a sensiblement

$$H = 0{,}2\ M;$$

de sorte que

$$S = 0{,}35\ M,$$

soit le tiers environ de l'intensité maxima.

Le flux lumineux, projeté en majeure partie sous le plan horizontal, la lumière émise dans l'hémisphère supérieure étant minime, vaut

$$\Phi = 4\pi S.$$

On se rappellera que les globes diffusants modifient complètement la répartition des rayons lumineux, en même temps qu'ils absorbent 15 à 50 pour 100 de la lumière, suivant leur degré de transparence.

Il faut tenir compte également de ce que les flux lumineux à considérer dépendent des applications. Pour une lampe destinée à éclairer une salle, on doit envisager le flux total, déduit de l'intensité moyenne sphérique; dans le cas de l'éclairage d'un espace découvert, c'est le flux rejeté vers le bas, déduit de l'intensité hémisphérique inférieure, qui entre en ligne de

compte. Enfin, pour les lampes qui doivent éclairer à distance, l'intensité horizontale est seule intéressante.

D'après M. Palaz, l'intensité lumineuse maxima, en bougies décimales, des arcs à courant continu fonctionnant, à feu nu, sous une tension de 40 à 50 volts, est donnée approximativement, en fonction de l'intensité du courant exprimée en ampères, par la formule empirique

$$M = 200\, i + 4\, i^2.$$

On tire de là

$$S = 0{,}35\ M = 0{,}35\ (200\, i + 4\, i^2).$$

La qualité des charbons a une influence considérable sur le rendement lumineux.

Les arcs alimentés par des courants alternatifs émettent des radiations lumineuses distribuées de la même manière au-dessus et au-dessous de l'horizon. Pour les petits arcs, la courbe de répartition d'un côté de l'axe des charbons comporte deux ailes de papillon à peu près symétriquement disposées par

Fig. 43.

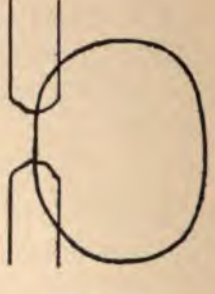


Fig. 44.

rapport à l'horizontale passant par le foyer, fig. 43. Quand la longueur de l'arc augmente, le point de rebroussement disparaît et la courbe prend une forme ovoïde, fig. 44.

Si l'on appelle M et M′ les intensités maxima, qui sont sensiblement égales, et H l'intensité horizontale, on a, suivant

M. Blondel, pour la valeur de l'intensité moyenne sphérique des arcs de 8 à 12 ampères,

$$S = \frac{H + M + M'}{4}.$$

Voici, d'après des mesures photométriques récentes, les consommations moyennes des divers genres d'arcs utilisés pour l'éclairage :

	WATTS PAR BOUGIE DÉCIMALE MOYENNE HÉMISPHÉRIQUE, SANS GLOBE DIFFUSANT	
	COURANT CONTINU	COURANTS ALTERNATIFS
Arc ordinaire	0,4	0,75
Arc à flamme	0,25	0,25
Arc enfermé	0,8	1,4

On estime à 0,6 watt environ par bougie la puissance absorbée par l'arc au mercure, dont la teinte spéciale et l'étendue rendent l'essai difficile.

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ÉTALONS DE MESURE.

On a cherché à représenter les unités électriques par des *étalons* ou, tout au moins, à définir nettement en fonction de ces unités des grandeurs électriques faciles à reproduire.

Pour chaque unité, il y a lieu de distinguer :

1) la définition théorique dans le système C. G. S.;

2) un *étalon prototype*, représentant l'unité ou une valeur connue en fonction de l'unité avec autant d'exactitude que possible;

3) des *étalons secondaires*, aisés à réaliser et à employer dans l'usage courant.

Certains phénomènes fugitifs, comme les courants électriques, ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons; dans un tel cas, on essaie de fixer la valeur de l'unité à l'aide d'indications fournies par un *appareil-étalon*, dont les éléments de construction sont parfaitement déterminés.

Étalons de résistance. — Pouillet et Werner Siemens ont proposé l'emploi du mercure pour construire un étalon de résistance, parce que ce métal peut être amené plus facilement

ue les conducteurs solides à un état de pureté et d'homogé-
éité bien défini, grâce à la distillation.

Le Congrès des Électriciens de 1881 avait décidé d'adopter, our étalon de l'ohm, la résistance à 0° C d'une colonne de ercure de 1 mm² de section et dont la longueur devait être xée par des mesures ultérieures. Diverses expériences ayant onduit à des longueurs voisines de 106 cm, on a proposé, en 884, une colonne mercurielle de 1 mm² de section et de 106 cm e longueur pour représenter l'*ohm légal*. Le Congrès de Chi-ago a défini, en 1893, sous le nom d'*ohm international*, la ésistance, à la température de la glace fondante, d'une colonne e mercure pesant 14,4521 grammes, de section transversale onstante et d'une longueur de 106,3 cm. C'est à ce dernier alon que nous nous rapporterons lorsque nous parlerons ohms sans autre indication.

L'ohm international ne diffère probablement de l'ohm théo-ique, égal à 10^9 unités C. G. S. électromagnétiques, que de ins de 0,02 pour 100. Cette approximation étant largement fisante pour les besoins de la pratique industrielle, l'ohm ernational peut servir de base aux transactions commer-les et a été légalisé dans plusieurs pays. Cela n'empêche s les savants de rechercher un étalon plus exact pour les sures de haute pression.

1 ohm international = 1,0028 ohm légal;

1 ohm légal = 0,9972 ohm international.

Siemens avait défini, en 1860, une unité arbitraire, désignée ar les initiales U. S. et représentée par la résistance à 0° C l'une colonne de mercure de 1 mm² de section et de 1 m de longueur.

1 ohm international = 1,063 U. S.;

1 U. S. = 0,9407 ohm international.

On trouve encore dans les laboratoires des boîtes de résis-ances dont les bobines ont été graduées à l'aide d'un étalon tabli, en 1864, par l'Association Britannique pour l'Avan-ement des Sciences et connu sous les initiales B. A. U.

1 ohm international = 1,01356 B. A. U.;

1 B. A. U. = 0,9866 ohm international.

Les étalons prototypes de l'ohm, qui n'existent que dans quelques laboratoires nationaux, sont construits en remplissant de mercure, purifié par voie chimique, puis par une distillation

Fig. 45.

dans le vide, des tubes de verre soigneusement calibrés et terminés dans des coupes élargies, fig. 45. Pour faire communiquer les étalons avec des circuits extérieurs, on plonge dans les coupes des électrodes à bouts de platine, afin d'éviter le contact du mercure avec un métal susceptible de l'altérer. Pour tenir compte de la résistance de raccordement du mercure d'un tube avec celui des coupes, la longueur de la colonne doit être réduite d'une quantité que l'expérience a montré être égale à 82 centièmes du diamètre du tube. Les tubes se placent dans des bains de pétrole remués par des agitateurs et refroidis extérieurement par de la glace. Ils sont faits en verre 59^{III} de la Fabrique Schott et Gen d'Iéna. On les vieillit par le recuit et on les remplit dans le vide, pour éviter l'air interposé contre le verre. La pesée du mercure et la mesure de la longueur des tubes ont lieu autant que possible à la température de 0^{o} C. On effectue aussi les mesures électriques à cette température, en choisissant des méthodes, telles que celles du galvanomètre différentiel et du pont de Kelvin, qui n'exigent pas des conducteurs de raccordement de forte section. Le courant de mesure ne peut pas atteindre une intensité de nature à échauffer sensiblement le mercure. Il faut au moins trois remplissages pour établir la valeur moyenne d'un tube. L'unité résulte elle-même de la moyenne d'au moins cinq tubes.

Une comparaison a été faite, en 1903, entre les tubes construits au National Physical Laboratory d'Angleterre et ceux de la

Reichsanstalt d'Allemagne, à l'aide d'étalons auxiliaires en métal solide. La différence des résultats n'a pas dépassé 0,001 5 pour 100.

Les étalons au mercure ne restent pas montés en permanence, de crainte d'altération possible du mercure.

On estime que les variations dues au travail moléculaire du verre sont de l'ordre de 0,002 pour 100.

La résistance du mercure en fonction de la température est

$$R_t = R_0 (1 + 0{,}000\,864\,9\,t + 0{,}000\,001\,12\,t^2),$$

mais il faut adopter une formule de correction tenant compte de la dilatation du verre, laquelle change avec la qualité de ce dernier.

Fig. 46.

Les étalons prototypes sont utilisés à la confection d'étalons secondaires plus portatifs, destinés aux laboratoires et contrôlés à des intervalles convenables. On a construit des étalons

secondaires à mercure ayant la forme représentée dans la fig. 46, mais on emploie de préférence des résistances solides. Celles-ci sont formées de bobines dont le fil conducteur est isolé avec soin et enroulé, en double pour éviter les effets électromagnétiques extérieurs et diminuer les réactions de self-induction, autour de carcasses en laiton recouvertes de taffetas de soie. Les extrémités du fil d'un tel étalon sont soudées à de grosses électrodes en cuivre, qui traversent le couvercle en ébonite de la boîte enfermant l'appareil et dont les bouts peuvent être plongés dans des godets à mercure. Un thermomètre permet de déterminer exactement la température du fil.

On choisit, pour fabriquer les étalons secondaires, des conducteurs ayant une grande résistivité, un faible coefficient de variation de la résistance avec la température et un pouvoir thermo-électrique minime par rapport au cuivre, afin de réduire autant que possible les forces électromotrices parasites dues à des inégalités de température dans les circuits. Les alliages sont préférables aux métaux purs, comme le montre le tableau ci-après.

NATURE DES CONDUCTEURS	RÉSISTIVITÉ EN MICROHMS-CM A 0°C	COEFFICIENT DE VARIATION DE LA RÉSISTIVITÉ PAR DEGRÉ, AUX ENVIRONS DE 15° C	POUVOIR THERMO-ÉLECTRIQUE AVEC LE CUIVRE, EN MICROVOLTS PAR DEGRÉ
Argent recuit	1,468	0,004	
Cuivre recuit	1,561	0,004 28	
Aluminium recuit	2,665	0,004 35	
Fer recuit	9,065	0,006 25	
Nickel recuit	12,323	0,006 22	
Plomb recuit	20,380	0,004 11	
Maillechort (60 Cu, 25 Zn, 15 Ni)	29,982	0,000 273	15
Platine-argent (33 Pt, 67 Ag)	31,582	0,000 243	
Manganine (84 Cu, 12 Mn, 4 Ni)	46,678	0,000 0	1 à 2
Constantan (60 Cu, 40 Ni)	50,000	0,000 0	40

Parmi les alliages, le maillechort a été longtemps le plus employé; l'expérience a montré que sa permanence est suffisante. Les alliages de platine sont cependant mieux à l'abri de l'oxydation. La manganine et le constantan sont excellents au

point de vue de l'indifférence vis-à-vis des variations de température. La première craint toutefois les températures supérieures à 150° et son oxydabilité oblige à la protéger par de la soie imbibée de gomme-laque. Le second a un pouvoir thermo-électrique assez élevé, au point qu'on en a fait des piles thermiques ; on le réserve pour les rhéostats industriels.

Il résulte d'expériences, poursuivies de 1891 à 1905 à la Reichsanstalt, par MM. Jaeger et Lindeck, sur la permanence de la manganine, que le plus grand écart observé entre 7 étalons solides de l'ohm construits avec cet alliage n'a pas dépassé 0,003 pour 100. Les coefficients de température de ces étalons, à 18° C, varient de 0,000006 à 0,000021. Une autre série de 7 étalons, essayée de 1898 à 1905, a présenté un écart maximum de 0,0015 pour 100 et des coefficients de température compris entre 0,000009 et 0,000021.

Les étalons secondaires construits pour la Reichsanstalt de Berlin, fig. 47, sont constitués par des bobines en fil de manga-

Fig. 47.

nine isolé avec de la soie imbibée de gomme-laque et soudé à l'argent, qu'on plonge dans le pétrole afin d'atteindre rapi-

dement l'équilibre de température. Les bobines nouvellement enroulées subissent des modifications moléculaires lentes, qui entraînent des changements de résistivité. Afin d'accélérer leur mise en service, on a eu l'idée d'appliquer un procédé analogue à celui dont on fait usage pour vieillir les thermomètres. On recuit les bobines dans une cuve à air, à une température de 140° C, pendant dix heures. Le fil atteint ainsi rapidement un équilibre moléculaire permanent. On ne vernit le fil qu'après le passage à l'étuve, afin d'être sûr que toute trace d'humidité est éliminée. Les étalons des sous-multiples de l'ohm sont formés de deux conducteurs dérivés : l'un, de section relativement forte, présente une résistance légèrement supérieure à la valeur requise; l'autre, beaucoup plus mince, est réglé jusqu'à obtenir la résistance combinée voulue. Les très faibles résistances, 0,001 ohm et en dessous, étant destinées à recevoir des courants intenses, sont placées dans un bain de pétrole agité par une roue à palettes pour uniformiser la température. Sur la résistance médiane de la fig. 47 on voit l'extrémité de l'axe de l'agitateur, auquel on communique un mouvement de rotation par un moteur électrique. Deux tubulures latérales servent à établir une circulation d'eau froide. Les deux grosses bornes donnent accès au courant et les deux petites servent au raccordement du galvanomètre destiné à la mesure de la différence de potentiel aux extrémités de la résistance.

Les étalons solides peuvent être garantis avec les approximations suivantes : bobines de 1 et 10 ohms, 0,01 pour 100; de 01, 0,01, 100 et 1000 ohms, 0,015 pour 100; de 0,001 et 10000 ohms, 0,02 pour 100; de 0,0001 ohm, 0,03 pour 100.

Le double enroulement, généralement usité pour les étalons en vue de diminuer l'inductance, a l'inconvénient de rapprocher les spires à des potentiels très différents, ce qui favorise les dérivations lorsque le fil n'est pas fort bien isolé et occasionne des effets de capacité susceptibles, avec les résistances supérieures à 500 ohms, d'apporter des perturbations dans certaines mesures. Ainsi, une bobine de 10000 ohms d'une boîte de résistances possédait une capacité de 0,0075 micro-

farad, correspondant à une self-induction négative CR^2 de 0,75 henry. L'enroulement simple eût donné une self-induction positive de 0,15 henry. On voit l'inutilité, dans ce cas, de l'enroulement double au point de vue de l'extra-courant; son seul avantage est la suppression du champ magnétique extérieur avec un courant permanent.

On réduit les effets de capacité en sectionnant les bobines, de manière à mettre les condensateurs partiels en cascade et à diminuer la tension entre les spires contiguës.

On obtient les mêmes avantages par les enroulements Chaperon et Feussner.

M. Chaperon forme les bobines par couches successives enroulées en sens inverses et comprenant des nombres égaux de spires. Les couches sont séparées par des épaisseurs d'étoffe de soie.

M. Feussner enroule un fil simple en une seule couche sur une lame mince de mica. Si la résistance doit être faible, il fait le bobinage avec une bande de métal, ondulée pour permettre les dilatations. La bobine plate est vernie à la gomme-laque et serrée entre deux plaques de mica, qui dépassent celle

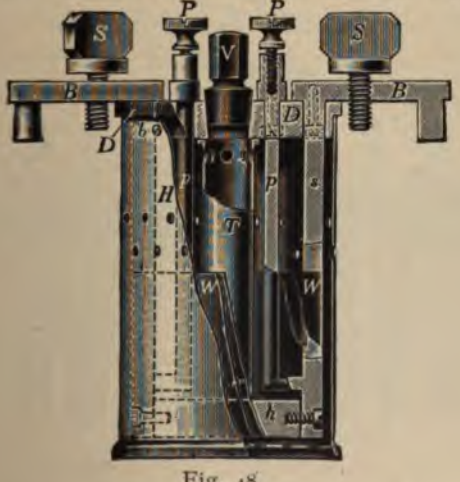


Fig. 48.

servant de carcasse à la bobine. Ce dispositif assure un excellent isolement. De plus, il peut se monter dans des caisses à

claire-voie où l'on ménage une circulation d'air ou d'un liquide isolant, afin de permettre l'adoption de densités de courant plus grandes que dans les bobines ordinaires.

La fig. 48 est une vue, en partie sectionnée, d'un étalon de faible résistance construit par M. Wolff. On a restreint dans ce modèle le nombre des soudures, en faisant d'une seule pièce de cuivre les tiges *s* et *p* auxquelles s'attache la bande de manganine W et qui portent les bornes de courant S S et les bornes de tension P P. Le récipient est percé de trous pour la circulation du pétrole et un tube intérieur T sert à l'introduction d'un thermomètre.

Boîtes de résistances. — Pour les besoins de la pratique, on construit des boîtes étalonnées à 1/1000 près, contenant des multiples et parfois des sous-multiples de l'ohm. Ces boîtes, en acajou, présentent un couvercle en ébonite portant des blocs de laiton, à chacun desquels sont fixées deux tiges auxquelles les extrémités des bobines sont soudées. Les résistances peuvent être éliminées du circuit de mesure par l'insertion de broches métalliques mettant en communication directe les blocs reliés aux deux bouts du fil d'une même bobine, fig. 49.

Fig. 49.

Il est nécessaire que le commencement et la fin de deux bobines voisines n'aboutissent pas à un conducteur commun, mais à des tiges métalliques distinctes, pénétrant séparément

dans le bloc correspondant, dont la résistance est pratiquement nulle. De cette manière la somme des résistances mesurées isolément est bien égale à la résistance totale. Afin de pouvoir déterminer séparément chaque résistance, il est bon que les blocs aient des évidements spéciaux, dans lesquels on peut introduire des chevilles munies de bornes.

Les bobines groupées communément dans les boîtes ont 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500, 1000, 2000, 2000, 5000 ohms. En les combinant, on peut former toutes les résistances, différant de 1 ohm, comprises entre 1 ohm et la somme des résistances partielles. Le système offre l'inconvénient d'obliger à une addition. De plus, les bobines mises en court-circuit sont nombreuses et, comme chaque broche offre une résistance de contact de l'ordre du 1/10000e d'ohm, il s'ensuit une erreur parfois très appréciable sur le résultat. Ainsi, lorsqu'on *débouche* la résistance de 1 ohm en laissant 15 chevilles insérées, une résistance de contact de 1/10000e d'ohm pour chacune d'elles conduit à une erreur de 0,15 pour 100. Pour diminuer autant que possible l'erreur, il faut nettoyer de temps en temps les chevilles avec un linge imbibé de pétrole et les essuyer ensuite avec soin. On doit s'assurer que les broches sont bien enfoncées, les vibrations pouvant les desserrer.

Il faut vérifier également si la plaque d'ébonite qui forme le couvercle de la boîte est bien propre et l'épousseter au besoin avec un blaireau ou une bande de cuir, les traînées de poussière conductrice constituant des dérivations entre les blocs de laiton. A la longue l'ébonite s'altère, particulièrement quand elle est exposée à la lumière et à l'humidité. Le soufre qu'elle contient vient former, à la surface, un enduit acide conducteur de couleur blanchâtre, qu'il faut enlever en lavant avec une solution diluée de soude, puis en séchant avec un linge mouillé de pétrole.

Afin de faciliter les combinaisons de résistances et de diminuer le nombre des chevilles employées, on a imaginé les *boîtes à décades*. Dans ce système, représenté par les fig. 50 et 51, on se sert de 9 bobines de 1 ohm, 9 de 10 ohms, 9 de 100 ohms, etc. Ces bobines sont montées en série entre de petits blocs de

laiton. A l'aide d'une seule broche, insérée entre l'un des petits blocs et une barre de laiton voisine, on peut mettre en circuit tout ou partie des bobines de chaque série. Ainsi, pour former la résistance 4703, il suffit de 4 chevilles, disposées dans les orifices portant les indications 4000, 700, 00 et 3. On évite de la

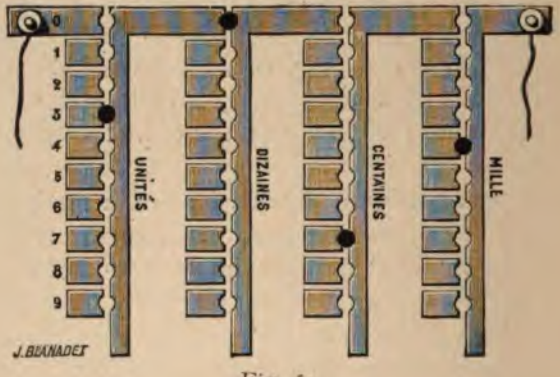


Fig. 50.

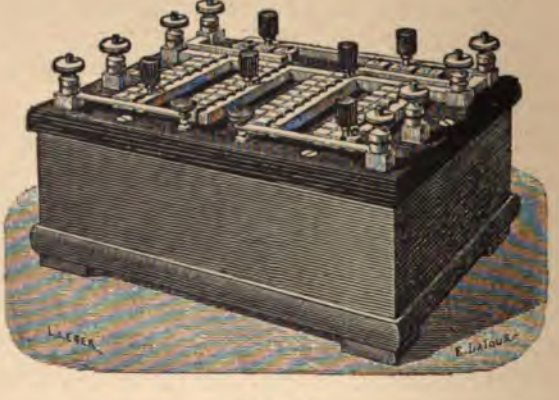


Fig. 51.

sorte l'addition exigée par le premier système. De plus, la correction nécessaire pour tenir compte des résistances de contact reste toujours la même. Cette deuxième disposition demande plus que le double du nombre des bobines nécessaires à la première, ce qui rend les boîtes plus volumineuses et plus chères.

Pour hâter les manœuvres, on substitue parfois aux broches

des manettes pour le réglage des résistances. Les fig. 52 et 53 montrent deux types de boîtes à manettes.

M. Feussner a imaginé une combinaison qui réunit les avantages des deux premiers dispositifs. Chaque décade est remplacée par un groupe de 5 résistances pouvant être associées

Fig. 52.

Fig. 53.

en série de manière à former, au moyen d'une seule cheville, une résistance totale indiquée devant l'orifice correspondant. La fig. 54 représente la disposition propre à réaliser les résistances comprises entre 1 et 9 ohms, à l'aide de 5 bobines de 1, 1, 1, 1 et 5 ohms.

Les diamètres des fils employés pour former les résistances diminuent à mesure que celles-ci augmentent, attendu que, pour une même différence de potentiel appliquée aux bornes de la boîte, les courants décroissent en raison inverse de la résistance offerte par cette dernière. La densité de courant admissible dépend de la résistivité du fil utilisé. Avec le maillechort, les bobines de 1 ohm sont pourvues de fil de 1 mm de diamètre; pour celles de 10 ohms, on adopte 0,4 mm; pour celles de 100 ohms, 0,25 mm et pour celles de 1000 ohms ou plus, 0,1 mm. La couverture isolante du fil comprend deux couches de soie blanche guipées en sens inverses ou une tresse de même matière.

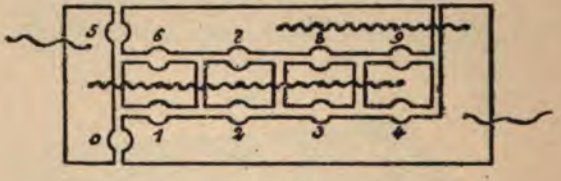


Fig. 54.

Pour construire une bobine, on commence par mesurer la résistance du fil par mètre, et l'on prépare une longueur de fil ayant environ 1 cm de plus qu'il n'en faut pour obtenir la résistance désirée. Si l'on emploie la manganine, on choisit un fil ayant à peu près $1/\sqrt{r}$ mm de diamètre, r étant la résistance requise. Le fil est plié en double et enroulé sur une carcasse en bois imprégné de paraffine ou en toute autre substance isolante non hygroscopique. On préfère actuellement les carcasses constituées par des tubes métalliques recouverts de taffetas gommé, afin de faciliter l'équilibre de température, lequel est également favorisé par la libre circulation de l'air dans les tubes et par la minceur des couches de fil. On adopte 50 à 100 cm² de surface rayonnante par watt dissipé en chaleur. L'une des extrémités du fil est soudée à une tige de cuivre assujettie par soudure dans l'un des blocs de laiton du couvercle de la boîte. L'autre extrémité est serrée dans une fente faite dans une tige fixée au bloc voisin et est glissée dans

cette fente jusqu'à ce qu'on obtienne la résistance voulue; après quoi, l'on soude cette seconde extrémité.

La bobine enroulée est parfois imprégnée de paraffine pour éviter l'oxydation du fil et les dérivations par l'humidité. La paraffine a l'avantage de fondre à 56° C, ce qui diminue les chances d'une élévation de température dangereuse. Cependant on se contente souvent d'une simple imprégnation de gomme-laque.

Après quelques mois, il est nécessaire de vérifier la résistance de la bobine, qui peut avoir changé par suite du travail moléculaire du métal. On ajuste à nouveau la résistance, soit en renforçant une des extrémités du fil par une addition de soudure, soit en grattant le fil. On a vu qu'on peut accélérer ces opérations en recuisant le fil après enroulement, de manière à lui donner immédiatement son état moléculaire définitif.

Avec les gros fils, on opère le réglage sur une dérivation shuntant la bobine entière ou une partie de celle-ci. Avec les fils minces, on soude aux extrémités des fils plus forts qui servent au réglage et aux connexions.

Le couvercle des boîtes de résistances est pourvu d'un orifice pour l'insertion d'un thermomètre. Toutefois, à cause de la paraffine qui recouvre le fil, plusieurs heures sont nécessaires pour obtenir l'équilibre de température. Quand les bobines sont isolées à la gomme-laque, on laisse une libre circulation d'air dans la boîte, qui est percée de trous à cette fin. Il faut avoir soin de ne jamais faire passer dans les bobines des courants intenses ou de longue durée. Les bobines peuvent être soumises à une différence de potentiel limite variant avec leur résistance et allant de 0,3 à 30 volts pour les bobines de 1 à 10000 ohms, ce qui correspond à $0{,}3/\sqrt{r}$ ampères pour l'intensité maxima du courant, si r est la résistance en ohms. Tout circuit contenant une boîte de résistances doit être commandé par une clef, qui est fermée seulement pendant les lectures. Celles-ci doivent être de courte durée, puisque l'échauffement dépend du temps de passage du courant, d'après la loi de Joule i^2rt, qui montre qu'il convient d'utiliser des courants faibles en employant des appareils de mesure sensibles.

Si les bobines n'éprouvent pas de changements de température supérieurs à ceux qu'on observe dans les laboratoires, la correction relative aux variations correspondantes de résistance est négligeable lorsque le fil est en manganine ou en un alliage analogue.

Les boîtes de résistances ordinaires sont réglées à 0,02 pour 100 près.

Rhéostats. — Les boîtes de résistances ne permettent pas de varier la résistance comprise entre leurs bornes par degrés insensibles, condition requise dans certaines expériences. Ce résultat est atteint par les rhéostats.

La forme la plus simple est le rhéocorde, qui consiste en un fil tendu, parallèlement à une règle divisée, entre deux blocs de cuivre auxquels il est soudé. Un curseur glisse sur le fil, de manière à présenter avec celui-ci un contact bien défini. La longueur comprise entre l'une des extrémités du fil et le curseur est insérée dans le circuit d'expérience et mesurée par la règle, avec ou sans vernier. Pour réaliser une longueur plus considérable dans un faible espace, l'on enroule le fil en hélice sur un cylindre d'ébonite. Le cylindre peut tourner autour de son axe dont un des bouts est fileté et passe dans un écrou, disposition qui communique au cylindre un mouvement de translation. Un doigt de contact immobile permet d'insérer une longueur variable de fil dans le circuit. Ces appareils laissent à désirer au point de vue des contacts mobiles et ne peuvent servir qu'avec des courants de faible intensité.

Les rhéocordes sont souvent en fil de platine iridié de 0,1 à 0,2 mm de diamètre. La tige de contact, en platine de 0,5 mm, est aplatie à l'extrémité, de manière à permettre de lire sa position à 0,1 mm près. Quand on veut obtenir des résistances plus grandes, on utilise du ruban de constantan, qui donne aisément 700 ohms par mètre.

Si l'on ne désire pas des résistances définies, mais seulement des résistances variables d'une façon continue, on peut employer des rhéostats à liquide, consistant en une solution aqueuse d'un sel reliée au circuit extérieur par des électrodes en même métal que celui du sel. On adopte, par exemple, le

sulfate de cuivre ou le sulfate de zinc, avec des électrodes en cuivre ou en zinc, afin d'éviter la polarisation. On modifie la résistance en plongeant plus ou moins les électrodes dans le bain ou en changeant leur écartement.

Résistances élevées. — Les résistances de l'ordre du mégohm peuvent être constituées à l'aide de bobines de 10000 ohms, par exemple, mises en série dans des boîtes, qui ne laissent pas d'être coûteuses.

Si une grande précision n'est pas nécessaire, on peut se contenter de traits de graphite tracés sur une plaque d'ébonite. Les extrémités sont cuivrées galvaniquement et reçoivent des bornes.

On réalise une résistance élevée, moins variable avec la température, par un dépôt de platine sur une bande de verre. Un tel dépôt peut être obtenu en traçant une ligne avec une plume chargée de solution d'un sel de platine et en chauffant le verre au rouge sombre pour effectuer la réduction du métal. On raccorde le trait à des fils étamés, par des soudures à l'étain.

Résistances artificielles pour courants intenses. — Les rhéostats à liquide peuvent servir pour les courants intenses, à condition de proportionner la surface des électrodes à l'intensité du courant. Ils ont l'inconvénient de varier très notablement de résistance avec la température. Dans les usines on utilise souvent des tonneaux à pétrole remplis d'une solution de carbonate de soude, où plongent des plaques en fer servant d'électrodes, dont on règle l'écartement par des tasseaux en bois. Un tonneau d'un hectolitre supporte facilement, en marche continue, une puissance d'environ 10 kilowatts sous 100 volts, si l'on a soin de remplacer le liquide qui s'évapore par de l'eau froide. Il faut isoler les tonneaux, en les disposant sur des poutres de bois sec ou des isolateurs. Les ouvriers qui renouvellent l'eau doivent monter sur les poutres ou porter des galoches en caoutchouc, pour éviter les secousses. Il est plus sûr et plus commode de prévoir une circulation continue du liquide, auquel cas on peut atteindre jusque 500 ampères sous 100 volts par tonneau. Quand il s'agit de voltages

élevés, tels que ceux produits par des alternateurs polyphasés, on suspend les électrodes dans l'eau courante d'un réservoir. Pour les courants triphasés on emploie trois tiges de fer équidistantes. S'il y a un cours d'eau à proximité, on peut y plonger directement les électrodes, en prévoyant des engins bien isolés pour régler leur immersion. On arrive ainsi à absorber plusieurs milliers de kilowatts, sans effets nuisibles de capacité ou de self-induction pour des essais industriels.

Une autre combinaison consiste à tendre des fils ou des bandes minces en zigzag entre des blocs de cuivre qu'on réunit par des chevilles ou des manettes, comme dans les boîtes de résistances. Pour les courants très intenses, on groupe les conducteurs en dérivation, de manière à faire croître la section avec l'intensité. Le groupement en dérivation conduit à des résistances individuelles relativement plus grandes que la disposition en série, attendu que, dans le premier cas, la résistance d'un élément constitue la résistance maxima disponible. On a aussi fait usage de toile métallique, pour obtenir une grande surface de rayonnement.

Lorsque la différence de potentiel appliquée est inférieure à 1 volt, on peut immerger les résistances dans l'eau sans crainte de décomposer celle-ci. On active ainsi le refroidissement des conducteurs, surtout si l'on entretient une circula-

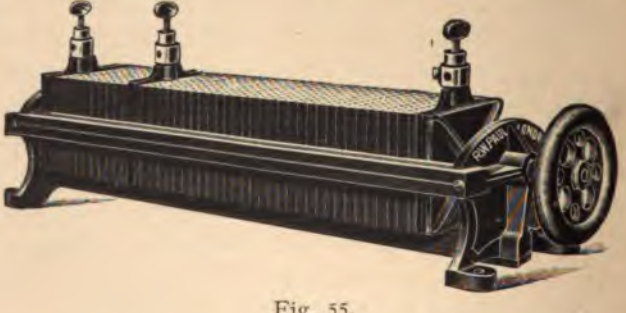


Fig. 55.

tion du liquide. On peut alors forcer la densité du courant électrique. En vernissant les fils, on peut dépasser la tension de décomposition de l'eau.

On a également préconisé l'usage de tubes conducteurs dans lesquels passe un courant d'eau.

On réalise un rhéostat variable par degrés insensibles, en empilant des plaques de charbon artificiel, fig. 55. On gradue le courant qui traverse la pile de plaques en modifiant les résistances de contact par une compression variable, obtenue à l'aide d'une vis de serrage.

Quand les résistances artificielles doivent être soumises à des tensions de l'ordre des centaines de volts, on utilise souvent des lampes à incandescence dans le vide, qui peuvent être groupées en série ou en dérivation. Les lampes constituent des résistances économiques qui ont l'avantage, lorsqu'il s'agit de courants alternatifs, d'être à peu près dépourvues de self-induction.

On évite également la self-induction et l'on obtient de fortes résistances sous un faible volume en recourant à un mélange cuit d'argile et de graphite. On change la conductibilité en modifiant la proportion de graphite. Avec des quantités égales les deux substances, on atteint une résistivité de 0,12 ohm-cm (Fleming). De telles résistances sont capables de supporter des températures relativement élevées.

Étalons de quantité d'électricité et d'intensité de courant. — Les phénomènes d'électrisation et de courant électrique étant temporaires ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons permanents, mais on peut déterminer le poids d'un métal déposé dans un bain électrolytique par l'unité de quantité d'électricité. D'après la décision du Congrès de Chicago, l'ampère est représenté par le courant qui, traversant une solution de nitrate d'argent dans l'eau, dépose 0,001 118 gr d'argent par seconde. On verra, à propos du tarage des galvanomètres, les précautions exigées pour effectuer le dépôt dans les conditions normales. Cette définition règle également le coulomb. La même quantité d'électricité dépose 0,000 3287 gr de cuivre. On estime que l'ampère défini par le dépôt d'argent peut être reproduit à 0,03 pour 100 près.

On fait aussi usage d'électrodynamomètres étalons, de construction bien définie, dont les indications correspondent à des

courants déterminés. Nous étudierons ces appareils dans un chapitre spécial. L'électrodynamomètre étalon du National Physical Laboratory donne une approximation de 0,02 pour 100.

Étalons de force électromotrice. — Quelques éléments voltaïques développent, dans des conditions déterminées, une force électromotrice suffisamment constante pour servir d'étalons.

L'un des éléments les mieux étudiés est l'élément normal de *Latimer-Clark*. Sous la forme recommandée par le Board of Trade, de Londres, il comprend un fil de platine plongeant dans du mercure versé au fond d'un tube à réactif noirci extérieurement. Au-dessus du mercure se trouve une pâte de sulfate de zinc et de sulfate mercureux, préparée à froid et dans laquelle est placé un bâton de zinc, fig. 56.

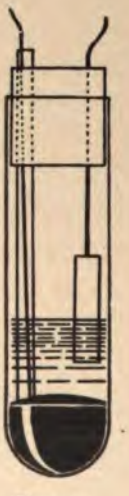


Fig. 56.

Le mercure doit être purifié par l'acide azotique, puis distillé dans le vide. Le zinc doit être redistillé. La tige de ce métal est soudée à un fil de cuivre, décapée dans l'acide sulfurique dilué, lavée à l'eau distillée et séchée sur du papier à filtrer.

Pour préparer la pâte, on commence par ajouter à du sulfate

de zinc du commerce, purifié par une seconde cristallisation, 50 pour 100 de son poids d'eau et 2 pour 100 d'oxyde de zinc destiné à neutraliser l'acide libre. On effectue la dissolution à une température qui ne doit pas excéder 30° C. On incorpore dans la solution 12 pour 100 de sulfate mercureux, en vue de transformer l'excès d'oxyde de zinc en sulfate; on filtre pour éliminer l'oxyde mercureux formé et on laisse cristalliser par refroidissement. Pour obtenir le sulfate mercureux à employer, on se procure du sulfate mercureux commercialement pur, on le lave à l'eau distillée froide, on décante et l'on répète deux fois cette opération, qui a pour effet d'éliminer le sulfate mercurique, reconnaissable à sa teinte jaune. On mélange ensuite les cristaux de sulfate de zinc avec du sulfate mercureux et une petite quantité de mercure; à l'aide de la solution concentrée de sulfate de zinc, on donne au mélange la consistance d'une crème. On agite énergiquement en maintenant une température ne dépassant pas 30° C. Lors du refroidissement, il doit se former des cristaux de sulfate de zinc dans toute la masse. S'il n'en est pas ainsi, on ajoute quelques cristaux et l'on répète l'opération.

Le tube à réactif a 2 cm de diamètre et 6 à 7 cm de longueur. Le mercure occupe 1,5 cm de hauteur; on y fait plonger le fil de platine, qui est protégé hors du mercure par un tube de verre dans lequel il est scellé. La partie du fil qui doit être immergée dans le mercure est chauffée au rouge au préalable. La pâte est versée dans le tube sur une hauteur de 2 cm. On enfonce la tige de zinc dans la partie supérieure de la pâte et l'on ferme le récipient par un bouchon de liège lavé à l'eau chaude et percé de trous pour le passage des électrodes ainsi que de l'air. On laisse reposer l'élément pendant 24 heures et on le scelle à la glu marine. Lors de l'emploi, on le place dans un bain d'eau, afin d'en déterminer facilement la température.

On recommande de n'utiliser cet élément qu'en circuit ouvert, avec des électromètres ou des condensateurs, ou dans les méthodes de compensation où il n'a à débiter que des courants très faibles.

Sa force électromotrice vaut 1,433 volt à 15°C, à moins de 0,1 pour 100 près. A une température t, voisine de 15°, elle est donnée, avec une approximation de 0,02 pour 100, par la formule

$$1{,}4328 - 0{,}00119\,(t - 15) - 0{,}000007\,(t - 15)^2 \text{ volt.}$$

L'élément précédent n'est pas portatif, car un renversement peut amener le mercure en contact avec le zinc. Pour le rendre transportable, la Reichsanstalt a adopté la disposition suivante, fig. 57. Le pôle positif est formé d'une lame de platine amalgamé, plongeant dans la pâte de sulfates contenue dans un vase poreux. La lame communique avec l'extérieur par un fil de platine traversant un tube de verre. Le pôle négatif est un bâton de zinc amalgamé, traversant aussi un tube de verre et recourbé à son extrémité inférieure en contact avec des cristaux de sulfate de zinc noyés dans une solution concentrée de ce sel. L'élément est fermé par un bouchon de liège, une

Fig. 57.

couche de paraffine et une couche de résine. Un thermomètre plonge dans la solution zincique. Le vase extérieur en verre est placé dans une enveloppe métallique protectrice, pourvue d'un couvercle en ébonite qui porte les bornes d'attache. L'élé-

ment mesure 10 cm de hauteur et 6 cm de diamètre. Il peut donner un courant de 100 micro-ampères pendant quelques instants. La force électromotrice de ce couple est

$$1{,}433 - 0{,}001\,(t - 15) \text{ volt.}$$

Si une approximation de 1/100 est suffisante, on peut se contenter d'employer des substances commercialement pures, en ayant soin de préparer la pâte à froid, après avoir vérifié si le sulfate mercureux est exempt de sulfate mercurique jaune, d'amalgamer le zinc et de faire baigner un fil de platine dans du mercure placé au fond du vase poreux. On obtient ainsi un couple qui est susceptible d'une plus grande précision que la plupart des combinaisons à base de sulfate de cuivre qui ont été employées. On peut faire débiter à cet élément un courant d'environ 0,0001 ampère par cm² d'électrode en zinc.

M. Gouy préconise, comme dépolarisant, le bioxyde jaune de mercure disposé au-dessus d'une couche de mercure dans laquelle plonge un fil de platine. Un bâton de zinc amalgamé, protégé par du papier à filtrer, trempe dans une solution de sulfate de zinc à la densité 1,06. L'élément, destiné à fonctionner à circuit ouvert, donne

$$1{,}386 - 0{,}000\,2\,(t - 12) \text{ volt.}$$

M. Weston a modifié l'élément Clark en remplaçant le zinc par un amalgame de cadmium et le sulfate de zinc par du sulfate de cadmium. Après divers essais, voici la méthode recommandée pour la confection de l'étalon.

Le récipient, en verre exempt de plomb, a la forme d'un tube en H, fig. 58. Les électrodes sont des fils de platine scellés dans le bas des éprouvettes, dont l'une contient une petite couche de mercure pur, préparé comme pour l'élément Latimer-Clark. Au fond de l'autre branche on introduit l'amalgame de cadmium, obtenu en dissolvant 1 partie en poids de cadmium exempt de zinc dans 8 parties de mercure. Cet amalgame est liquide à 100° C. On ajoute ensuite à du sulfate de cadmium pur et cristallisé un poids égal d'eau. On décante la solution saturée et on verse une couche de 5 mm de la bouillie restante

sur l'amalgame de cadmium de l'élément. L'excédent de la bouillie est broyé dans un mortier avec du sulfate mercureux lavé, un peu de mercure et de la solution saturée de sulfate de cadmium, afin de réduire le sulfate mercurique qui peut

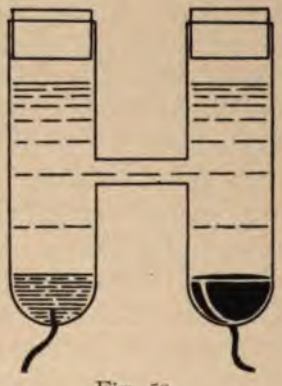


Fig. 58.

exister dans le mélange. On coule une couche de 5 mm de dernier sur le mercure du récipient. Les branches du tu sont enfin remplies de solution saturée et de cristaux de sulfa de cadmium. On ferme avec des bouchons et de la gomm laque, en laissant un peu d'air pour éviter les bris par dilat tion. Il est plus sûr de sceller les branches à la lampe.

L'élément Weston offre l'avantage de prendre immédiat ment sa force électromotrice normale de 1,0186 volt à 20° tandis que l'étalon Clark doit reposer quelques semaines ava l'emploi. Le coefficient de variation de la force électromotri avec la température n'atteint que 0,004 pour 100 par deg centigrade, tandis qu'il est d'environ 0,1 pour 100 dans le c de l'élément Clark. Il peut être négligé dans les mesures indu trielles. Au voisinage de 20° C, la formule de correction est

$$1{,}0186 - 0{,}000\,04\,(t - 20) \text{ volt.}$$

Suivant M. Smit l'étalon au cadmium peut être reproduit à 0,002 pour 100 près, mais sa permanence ne dépasse pas 0,01 pour 100. Avec des réactifs, dits chimiquement purs, du commerce, l'écart ne dépasse pas 0,2 millivolt. L'élément est ordi-

nairement employé à circuit ouvert ; toutefois on peut lui faire débiter pendant quelques instants 0,05 milli-ampère par cm^2 de surface d'électrodes, sans faire tomber la force électromotrice de plus de 0,5 millivolt.

On réalise un élément Weston transportable en remplaçant le mercure par du platine amalgamé et en recouvrant l'amalgame de cadmium d'une couche d'asbeste ou de laine de verre et d'une rondelle de porcelaine trouée, retenue par une baguette de verre.

Les premiers éléments Weston, montés avec de l'amalgame à 14,3 pour 100 de cadmium, ont montré quelques irrégularités aux environs de 0°C. Ces divergences ne se sont pas présentées avec les couples dont l'amalgame contient 12 à 13 pour 100 de cadmium. Il est très important qu'il y ait du sulfate de cadmium à l'état solide. Les essais faits à la Reichsanstalt ont prouvé que les éléments Weston ne varient pas de plus de 0,01 pour 100 en six ans. Ils sont adoptés, avec les étalons Clark, dans la plupart des laboratoires.

Lorsque les étalonnages exigent des courants d'une certaine intensité, l'on se sert parfois d'éléments à sulfate de cuivre ou d'accumulateurs, qu'on tare au préalable à l'aide d'un couple étalon. Un élément secondaire du genre Planté donne, à circuit ouvert, une force électromotrice voisine de 2 volts, quand il est à moitié déchargé. On doit user avec discernement des accumulateurs, car leur résistance intérieure minime permet la production de courants susceptibles de détruire les bobines des boîtes de résistances. Il est prudent de mettre en série avec ces couples une résistance de sécurité empêchant tout accroissement dangereux de l'intensité du courant.

Étalons de capacité. — On sait que la capacité des condensateurs à diélectrique solide dépend de la tension appliquée, de la durée de charge et des charges antérieures. La première décharge est suivie d'une décharge résiduelle qui, avec les bons diélectriques, tels que le mica, représente 1 à 2 pour 100 de la précédente et provient d'une sorte de pénétration de l'électricité dans l'isolant. Avec les diélectriques médiocres, la conduction joue, en outre, un rôle important.

Il résulte de là qu'un condensateur parfait devrait avoir des armatures séparées par de l'air ou un autre gaz sans résidu. Encore faudrait-il prendre la précaution de soustraire l'appareil à l'ionisation, qui peut déterminer une certaine conduction.

Malheureusement, les condensateurs à gaz, comme le condensateur à anneau de garde, ont de faibles capacités. Il est nécessaire de les abriter dans une enveloppe métallique servant d'écran électrique.

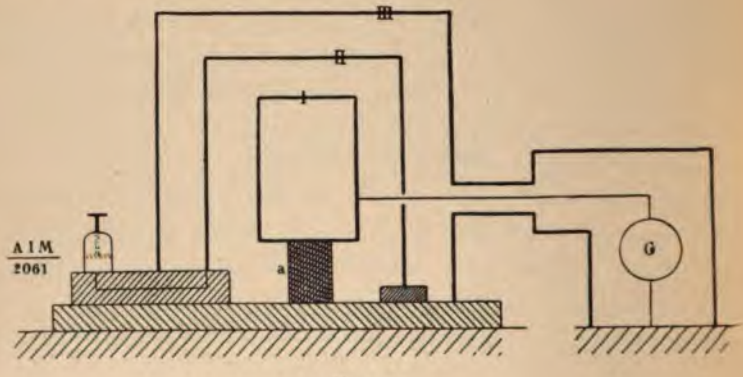


Fig. 59.

La fig. 59 montre le schéma du condensateur à gaz de M. Harms, utilisé pour les mesures de radio-activité. I et II représentent deux armatures cylindriques isolées, dont la première repose sur un support d'ambre cannelé *a*. III est un écran relié à la terre et susceptible d'être prolongé par un autre écran entourant un galvanomètre balistique sensible. Supposons qu'après avoir réuni I à la terre, par l'intermédiaire du galvanomètre, on connecte II à l'un des pôles d'une pile, dont l'autre pôle communique avec le sol. Si l'on met ensuite II à la terre, la charge électrique de I, égale au produit de la capacité bien définie II-I par la force électromotrice de la batterie, s'écoule à travers le galvanomètre. Pour obtenir une élongation renforcée, il suffit de manœuvrer, à des intervalles réglés sur la période de l'équipage mobile, la clef réunissant II alternativement à la pile et à la terre.

Dans le cas d'un condensateur plan à anneau de garde — la

capacité peut être déterminée par le calcul[1]. Il en est de même pour un condensateur cylindrique dont le tube extérieur est continu et dont le tube intérieur, moins long que l'armature enveloppante, est prolongé à chaque extrémité par des bouts de tube détachés, jouant le rôle de l'anneau de garde dans le condensateur plan.

Lorsqu'on doit réaliser des condensateurs étalons d'une capacité de l'ordre du microfarad, qui est l'unité usuelle de capacité, il est nécessaire de donner aux armatures de grandes surfaces et l'on utilise des cahiers de feuilles d'étain séparées par des lames minces d'un diélectrique solide, tel que le mica exempt d'oxydes métalliques. Les feuilles d'étain ont un coin

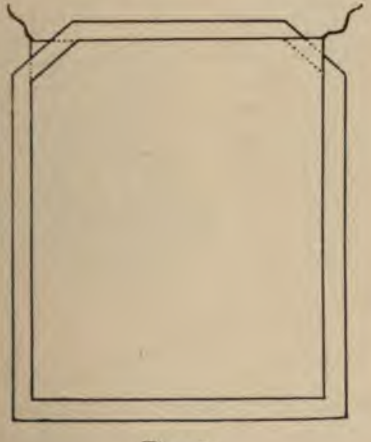


Fig. 60.

coupé et sont réunies par un autre coin en deux séries dont les éléments alternent, la jonction étant assurée au moyen d'une soudure à basse température. Les coins coupés d'une série correspondent aux coins soudés de l'autre, fig. 60. Les lames de mica débordent tout autour des feuilles d'étain, afin d'assurer l'isolement de celles-ci. Elles ont deux coins coupés, qui laissent dépasser les coins soudés des feuilles d'étain. Les

[1] Eric Gerard; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. VII. — Gauthier-Villars, Paris.

éléments superposés sont enduits d'un agglutinant, tel que paraffine en couche extrêmement mince. On doit éviter paraffine blanche, qui reste souvent imprégnée des substanc ayant servi à la décoloration. On a soin de mettre assez feuilles d'étain pour obtenir une capacité un peu supérieure celle à laquelle on désire arriver. Lorsqu'elles sont empilées serrées, on étalonne le condensateur en déchirant des feuill d'étain jusqu'à ce qu'on ait la capacité voulue. On place alo le bloc dans une caisse en bois sur un lit de paraffine et l' remplit la boîte de paraffine. L'intervalle entre l'étain et boîte doit être suffisant pour que celle-ci ne puisse jouer rôle d'armature. Des fils de cuivre relient les coins soudés deux séries de feuilles à des blocs de laiton portés par le c vercle en ébonite de la boîte. On peut aussi donner aux ments la forme indiquée dans la fig. 61.

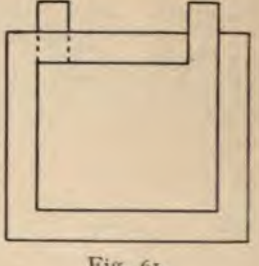


Fig. 61.

M. Bouty a obtenu des condensateurs de très petit volu en constituant les éléments de plaques minces de mica argent sur une face, ce qui évite l'emploi de la paraffine.

Dans les condensateurs à bas prix, on remplace le mica p le papier paraffiné, qui n'a pas la même permanence, surto lorsque la paraffine a été blanchie par un acide incomplètemen éliminé. Il est nécessaire de soumettre les feuilles empaquetées à une température prolongée de 120° C pour dessécher le papier.

Les condensateurs à mica sont exacts à 0,1 pour 100 près, tandis que ceux qui utilisent la paraffine ne donnent guère qu'une approximation de 0,5 pour 100. Encore faut-il se place exactement dans les mêmes conditions, de manière à obteni soit la charge totale, soit la charge initialement disponible. O

notera qu'une élévation de température accroît la charge résiduelle du diélectrique et diminue l'isolement des armatures. Les condensateurs doivent être réétalonnés assez fréquemment.

La fig. 62 est la vue extérieure d'un appareil qui comporte 5 subdivisions du microfarad reliées suivant le schéma de la fig. 63. L'armature commune enveloppe les sections raccordées aux barres transversales. A l'aide de fiches, on peut associer les condensateurs divisionnaires en surface.

Lorsqu'un condensateur est inactif, il faut avoir soin de réunir ses deux armatures par une broche métallique, afin de neutraliser la charge résiduelle.

Fig. 62.

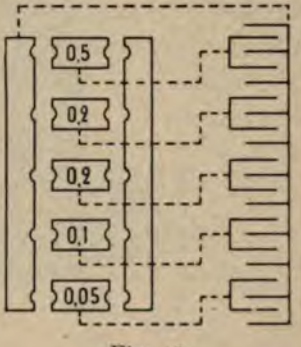


Fig. 63.

La différence de potentiel aux armatures des condensateurs ordinaires ne doit pas dépasser 100 volts et il convient d'éviter les extra-courants donnant une tension anormale.

Les courants alternatifs ne font entrer en jeu que la charge disponible. Ils ont l'inconvénient de provoquer un échauffement des diélectriques impurs, ce qui met rapidement les condensateurs hors service. De plus, ils exposent à des phénomènes de résonance occasionnant des surélévations dangereuses de la tension.

Quand des tensions élevées sont à craindre dans les essais industriels, il faut adopter des condensateurs spéciaux, tels que les jarres de Leyde remplies d'eau, dont la mise en cascade permet de graduer la différence de potentiel. M. Moscicki a construit des condensateurs à haute tension au moyen de

réservoirs cylindriques en verre dont l'épaisseur est renforcée autour de l'ouverture rétrécie. L'armature extérieure et l'armature intérieure sont obtenues par l'argenture des parois du verre. La première est recouverte d'un cuivrage épais et le réservoir est rempli d'un mélange incongelable d'eau et de glycérine, qui restreint les élévations de température sous l'action des courants alternatifs.

Pour certaines études, on doit réaliser des *câbles artificiels*, offrant une capacité et une résistance réparties de la même manière que dans les câbles sous-marins. Deux procédés sont en usage pour former ces appareils.

Le premier consiste à disposer en série des bobines de résistance calibrées, entre lesquelles sont échelonnés des condensateurs réunis en dérivation et produisant ainsi un effet de condensation analogue à celui qu'on observe avec les câbles, fig. 64.

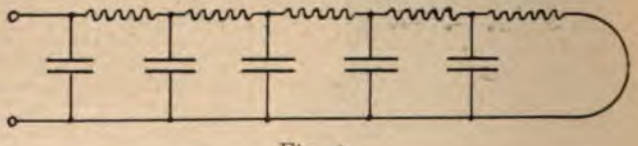


Fig. 64.

Le second moyen, imaginé par Muirhead, permet de répartir la capacité uniformément. L'une des armatures d'un condensateur est formée de feuilles d'étain, comme dans les condensateurs ordinaires. L'autre armature comporte des bandes d'étain disposées en zigzag et reliées en série de manière que leur résistance représente celle du câble. En constituant le diélectrique par une résine qui présente les mêmes effets de charge résiduelle que la gutta-percha, l'on peut étudier, à l'aide de ces câbles artificiels, tous les phénomènes manifestés par les câbles sous-marins.

Étalons d'induction. — Les étalons de self-induction peuvent être fixes ou variables.

Les étalons fixes sont des bobines, enroulées sur des noyaux isolants, en marbre blanc ou en ardoise, de manière à éviter les courants de Foucault. Il est à remarquer que, pour une

bobine de volume déterminé, si l'on néglige l'espace occupé par les isolants, la self-induction $\mathcal{L}$ et la résistance r sont proportionnelles toutes deux au carré du nombre de spires. La constante de temps $\mathcal{L}/r$, seul élément important dans les circuits parcourus par des courants variables, ne peut donc être modifiée qu'en agissant sur les dimensions de la bobine.

Fig. 65.

MM. Ayrton et Perry ont construit un étalon variable de self-induction, en disposant à l'intérieur d'une bobine circulaire immobile une seconde bobine reliée en série avec la première et pivotant autour d'un axe diamétral, ce qui permet de changer l'angle des deux bobines entre les limites 0° et 180°, fig. 65. La self-induction du système est minima lorsque les bobines sont parallèles et parcourues par le courant en sens opposés. Quand la bobine mobile a fait un demi-tour, l'inductance devient maxima. Une graduation empirique indique les valeurs de la self-induction correspondant à des positions repérées. Les bobines sont enroulées sur des carcasses en bois qui, malgré tous les soins que le fabricant peut apporter à leur exécution, se déjettent à la longue en occasionnant des variations du coefficient d'induction. La capacité des spires voisines doit être prise en considération dans les mesures où l'on fait usage de cet étalon

Chapitre V.

MATÉRIEL D'UN LABORATOIRE ÉLECTRIQUE.

Locaux. Dispositions générales. Mesures de précision. — Si l'on veut installer un laboratoire permettant des mesures très précises, il faut, autant que possible, l'établir à l'écart des champs magnétiques créés par les dynamos et des grandes masses de fer mobiles, afin que les appareils employés dans les essais ne soient pas influencés. On ne perdra pas de vue que les masses de fer fixes peuvent prendre une aimantation variable sous l'action de courants voisins. Peu de laboratoires sont à l'abri de l'influence des courants de tramways. Aussi les instruments délicats à aiguille magnétique mobile doivent-ils être protégés ordinairement par des écrans spéciaux, dont il sera question plus loin. Les galvanomètres à aimants fixes peuvent, au contraire, être installés à quelques mètres des machines électriques. Les câbles transportant des courants intenses seront tordus ou croisés, en vue de neutraliser leurs actions électromagnétiques.

Pour faire arriver des conducteurs à une table d'expérience, il est commode de munir celle-ci d'un montant, qui peut être formé par le prolongement d'un des pieds. Ces conducteurs, appuyés sur des roulettes en porcelaine assurant un bon

isolement, traverseront les passages à une hauteur suffisante pour ne pas gêner la circulation. Dans les circuits parcourus par des courants faibles, on établit les connexions à l'aide de fil de cuivre couvert d'une couche de gutta-percha, laquelle est facile à enlever. Les courants intenses exigent des cordes de cuivre étamé isolées au caoutchouc.

Quand les appareils sont destinés à des mesures d'isolement ou doivent être soumis à des potentiels très élevés, il faut les disposer sur des plaques d'ébonite, de gutta-percha ou de paraffine. Si les instruments doivent être fixés aux tables, il est préférable de les coller au moyen de composition Chatterton, plutôt que d'employer des vis qui détruisent souvent l'isole-

Fig. 66.

ment. On peut assurer un bon appui momentané à l'aide de pinces en bois ou en ébonite, fig. 66 Les batteries d'essai sont posées sur des feuilles isolantes ou sur des isolateurs en porcelaine. Les instruments et les clefs de circuit utilisés avec de hautes tensions doivent être nettoyés à l'aide d'un linge imbibé d'huile minérale, puis essuyés avec un linge sec, de façon à laisser une légère couche isolante. Pour les voltages élevés on arrange les commutateurs de manière à pouvoir les manœuvrer par l'intermédiaire de manches en ébonite.

Les appareils à réflexion doivent être installés sur une base bien stable, ce qui n'est pas toujours aisé à réaliser dans le voisinage des ateliers industriels.

On choisit de préférence des consoles fixées à des murs solides. Ceux-ci vibrent suivant leur période propre, généralement très courte, sous les chocs qui leur sont communiqués de l'extérieur par l'intermédiaire du sol. On évite l'influence de ces vibrations en réglant la période des équipages mobiles des appareils de manière qu'elle soit beaucoup plus lente et sans rapport simple avec celle des murs. On y arrive en agissant sur les ressorts tendeurs dans le cas des galvanomètres du genre Deprez et d'Arsonval.

Toutefois les murs peuvent transmettre des chocs complexes, tels que ceux provenant du roulement des véhicules, de nature à faire vibrer les suspensions des appareils. On ne peut empê-

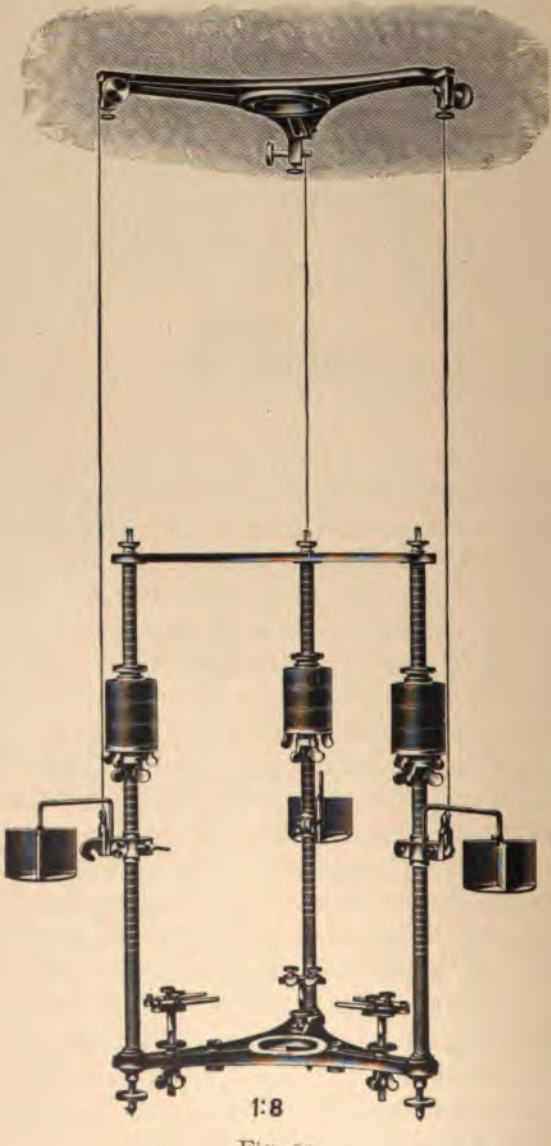


Fig. 67.

cher cet effet nuisible que par des dispositifs d'amortissement spéciaux.

On peut, par exemple, supporter les instruments à réflexion sur un bloc de pierre, épais de 15 à 25 cm et reposant sur un matelas élastique. Le feutre de crin de cheval, connu sous le nom de trichopièze, convient pour cet usage. Les vibrations s'amortissent dans le matelas et ne peuvent mettre en mouvement la masse de pierre.

Un autre moyen consiste à suspendre, par quatre fortes lanières de caoutchouc, quatre ressorts à boudin ou quatre chaînes, un bloc de pierre ou une épaisse plaque de plomb soutenant l'appareil à soustraire aux vibrations.

M. Julius a montré qu'on amortit plus complètement les trépidations en supportant la cage de l'appareil par trois longs fils métalliques verticaux et en ayant soin de fixer à la cage des contrepoids réglés de manière que le centre de gravité du système soit dans le plan horizontal passant par les points d'attache des fils, fig. 67. S'il persiste des oscillations horizontales, on les éteint en munissant la cage d'ailettes qui plongent dans des coupes contenant un liquide visqueux. Le système se termine inférieurement par trois vis calantes qu'on descend sur une console quand on veut reposer l'appareil.

La fig. 68, représente un galvanomètre soutenu par une suspension amortissante construite sur les indications de l'auteur et qui donne également de bons résultats. Une potence, scellée dans le mur à 2,50 m environ au-dessus du galvanomètre, est formée d'un fer en U dont l'extrémité est ouverte en fourche. Les branches de la fourche, ainsi que leur partie commune, portent trois fils d'invar de 1,35 mm de diamètre, qui viennent s'attacher à trois tiges verticales entretoisées par deux disques métalliques dont l'écartement est réglable. Le disque supérieur est annulaire, de manière à livrer passage au galvanomètre. Celui-ci appuie sur un disque de plomb posé, par l'intermédiaire de feutre de crin de cheval, sur le disque inférieur. Les oscillations qui se produisent quand on touche à l'appareil sont amorties par des fils de caoutchouc réunissant la suspension à une console ou à toute autre pièce fixe.

Il est bon de placer les pieds des tables de laboratoire sur des coussins amortissants en feutre de crin enfermé dans des boîtes sans couvercle.

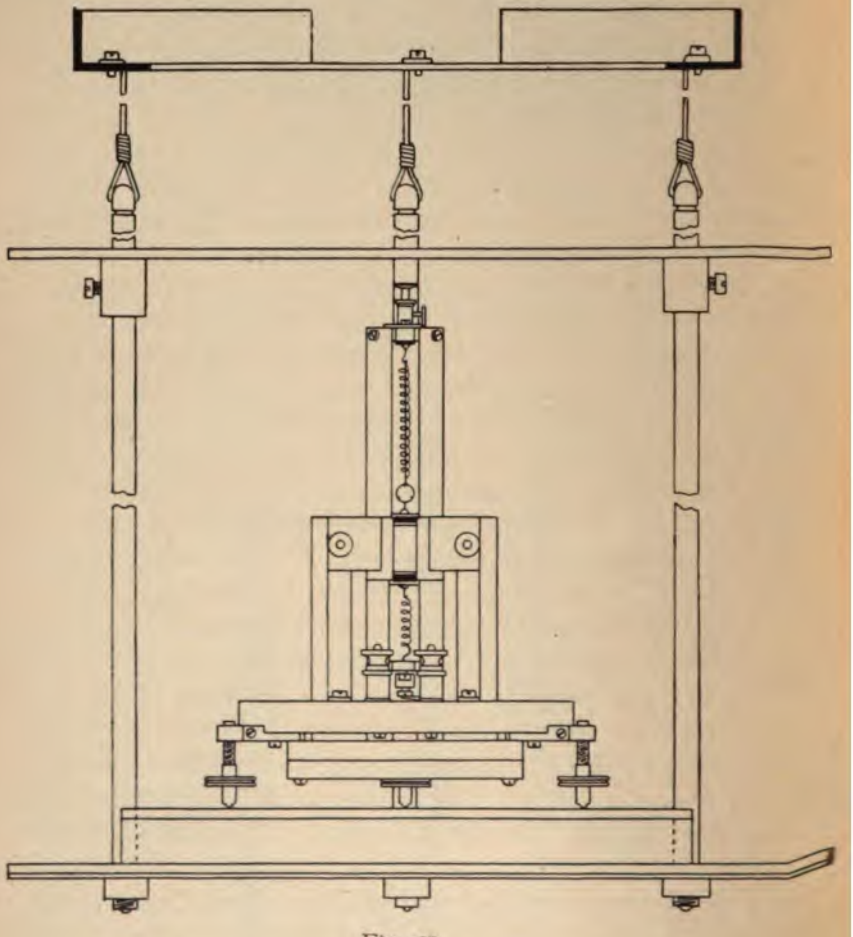


Fig. 68.

Si l'on veut transporter un instrument pourvu de trois vis calantes sur des supports différents, en le remettant chaque fois dans une position bien définie, on trace dans les supports trois rainures formant des angles de 120° et destinées à recevoir

les pointes des vis. Celles-ci peuvent aussi être repérées en les posant sur trois petits tasseaux fixes, dont le premier est plan, le deuxième muni d'une rainure et le troisième d'un trou.

On règle la hauteur des appareils suivant qu'on doit les observer debout ou assis. Dans le premier cas, les miroirs destinés aux lectures sont placés à 1,60 m du sol et, dans le second cas, à 1,25 m.

Certains essais spéciaux demandent des locaux à température constante. Pour maintenir des appareils à un degré thermométrique rigoureusement invariable, il faut les enfermer dans des thermostats à réglage automatique, car la présence même des observateurs tend à modifier la température des objets voisins. Les variations du thermomètre sont faibles dans les sous-sols exposés au nord, ainsi que dans des chambres à doubles murs et matelas d'air avec ouvertures vers le nord. On empêche la température de descendre au-dessous d'une limite déterminée en adoptant un chauffage au gaz avec régulateur automatique sur l'arrivée du gaz. Dans les pays où la température s'élève beaucoup, on est parfois obligé de refroidir l'air des laboratoires et de diminuer son degré d'humidité. A cet effet, on peut alimenter les salles d'air chassé par des ventilateurs sur des radiateurs qui sont traversés par de l'eau refroidie. En hiver les mêmes radiateurs peuvent recevoir de l'eau chaude.

La détermination de l'intensité et de la différence de potentiel se fait, dans le cas des courants continus, d'une manière très exacte, au moyen des galvanomètres à réflexion, gradués comme ampèremètres et comme voltmètres, et par les méthodes spéciales que nous décrirons, parmi lesquelles les dispositifs d'opposition et les balances électrodynamiques sont les plus usités. Un potentiomètre ou pont de compensation suffit pour tous les étalonnages relatifs aux courants continus, tandis que les balances électrodynamiques permettent la graduation des appareils à courants alternatifs.

Dans les usines électriques, on est souvent obligé de se contenter d'appareils moins précis que les instruments à réflexion, par suite de la nécessité d'effectuer les mesures au

milieu des machines. On se sert d'instruments à lecture directe, qui sont d'ailleurs à peu près les seuls employés pour les essais effectués sur les alternateurs et les transformateurs. Pour les courants continus, on choisit encore de préférence les appareils basés sur le principe du galvanomètre Deprez et d'Arsonval, afin d'éliminer autant que possible l'influence des champs magnétiques extérieurs. Pour les hautes tensions, les voltmètres électrostatiques sont avantageux.

Les appareils à lecture directe doivent être fréquemment étalonnés. Les bons modèles sont susceptibles de donner, dans la région moyenne de leur échelle, une approximation de 0,5 pour 100, ce qui limite l'erreur à 1 pour 100 dans l'estimation de la puissance électrique par le produit des lectures d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Cette exactitude est suffisante lorsqu'on essaie des dynamos conduites par des machines à vapeur dont les irrégularités exposent à des erreurs au moins aussi fortes. L'emploi des appareils à lecture directe est également justifié si l'on fait simultanément la mesure de la puissance mécanique en relevant des diagrammes d'indicateur, car l'évaluation de ces diagrammes entraîne des erreurs au moins du même ordre. Si une approximation plus grande est requise, il faut recourir à d'autres procédés, tels que l'utilisation d'un pont de compensation.

Il faut, dans un laboratoire électrique de précision, une série d'étalons de résistance de 0,0001, 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 et 10000 ohms, vérifiés de temps à autre dans un laboratoire d'étalonnage. Il faut également des piles étalons, des condensateurs, des boîtes de résistances, des rhéostats et les principaux appareils de mesure pour courants continus et pour courants alternatifs, en particulier, des galvanomètres Deprez et d'Arsonval avec bobines à forte et à faible résistance, ainsi qu'un galvanomètre astatique de grande sensibilité pour les essais d'isolement. Ce dernier instrument devra être protégé par un écran magnétique, si l'on veut s'en servir pour l'exécution de méthodes autres que celles de zéro.

Les mesures magnétiques demandent des perméamètres et des hystérésimètres.

Une précaution recommandable consiste à enfermer les boîtes de résistances, ponts et appareils semblables dans des caisses dont le couvercle est enlevé au moment des essais. On évite de cette façon les poussières, ainsi que l'action de la lumière et de l'humidité sur les instruments.

A côté des appareils électriques, il convient de prévoir un mètre étalon en invar, des poids étalonnés et un bon chronomètre non magnétique. Une balance sensible à court fléau, pouvant peser 200 gr à 1 mmgr près, un baromètre et des thermomètres sont également nécessaires. Pour relever la température des bobines et des machines, on fait des thermomètres à réservoirs aplatis, qui s'appliquent mieux sur les surfaces rayonnantes. Il est désirable de posséder aussi des thermomètres en verre d'Iéna au silicate de bore, où le mercure est sous une pression d'azote ou d'acide carbonique de 20 atmosphères et qui permettent d'évaluer jusque 575° C. Des calibres pour la mesure des diamètres extérieurs et intérieurs sont utiles.

Une batterie d'accumulateurs, capable de débiter des courants intenses et réguliers, est indispensable pour l'étalonnage des appareils.

Il est commode de diviser les laboratoires par des cloisons de manière à séparer les différents groupes d'opérateurs, afin que ceux-ci ne se gênent pas mutuellement. Si l'on ne veut pas limiter définitivement les diverses installations, on peut, par exemple, laisser à chaque étage un couloir longitudinal sur lequel s'ouvrent autant de portes qu'il y a de fenêtres aux murs de façade. En prévoyant un radiateur devant chaque fenêtre, on pourra, par des cloisons mobiles, partager l'étage en un nombre de locaux distincts égal à celui des fenêtres.

Laboratoire industriel. — Un laboratoire industriel destiné à l'épreuve des machines électriques doit être pourvu de moteurs d'une puissance en rapport avec celle des génératrices à essayer. On adopte de préférence des machines motrices spéciales, aussi régulières que possible, pour assurer l'indépendance du service des essais. On atteint le même résultat en utilisant des électromoteurs alimentés par des batteries

d'accumulateurs locales. Cette solution procure une grande constance de la vitesse. A défaut d'accumulateurs, on raccorde les moteurs à une distribution électrique, mais alors les à-coups du réseau réagissent sur la marche des machines.

Il convient de prévoir un ensemble de génératrices à courant continu et à courants alternatifs permettant de réaliser les principales expériences courantes.

Les tensions usuelles en courant continu sont 100 à 125, 200 à 250 et 440 à 550 volts. On peut recourir à des dynamos en dérivation pour obtenir ces divers voltages, qu'on règle exactement en agissant sur les rhéostats de champ. Pour ne pas multiplier les génératrices, on peut produire différents voltages en changeant la vitesse par des jeux de poulies convenables ou par des électromoteurs à vitesse variable, mais ce procédé n'est pas favorable au point de vue de l'effet utile des génératrices. Si les génératrices ou le réseau desservant le laboratoire ne fournissent qu'une seule tension, on peut réaliser les autres différences de potentiel par des transformateurs rotatifs ou par des diviseurs de tension. (1)

Les essais à courants alternatifs demandent une grande variété de tensions, de fréquences et de phases. De plus, pour certaines épreuves délicates, telles que celles des compteurs et autres appareils de mesure, il faut disposer d'alternateurs donnant des courbes sensiblement sinusoïdales et pouvoir produire des déphasages déterminés entre les différences de potentiel et les courants.

Les divers voltages sont aisément obtenus par des transformateurs statiques à rapports de réduction variables. (2)

Pour modifier la fréquence, on agit sur la vitesse du moteur attaquant l'alternateur ou l'on se sert de jeux de poulies appropriés.

Si l'on accouple deux alternateurs triphasés à l'aide d'un manchon à calage réglable, on peut réaliser des écarts définis

(1) Eric Gerard ; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. II. — Gauthier-Villars, Paris.

(2) Idem.

entre les phases des deux machines, ce qui permet des essais avec des déphasages quelconques.

Il est bon de pourvoir les alternateurs du dispositif Joubert pour le tracé des courbes de différence de potentiel, à moins qu'on ne possède un oscillographe.

Les génératrices sont reliées à des tableaux de distribution comportant les appareils de sécurité et de manœuvre, les rhéostats de réglage, les ampèremètres, voltmètres, wattmètres, phasemètres, etc. Si l'on utilise des électromoteurs, ceux-ci sont raccordés à des tableaux analogues. En cas d'emploi d'accumulateurs, on a recours à des combinateurs pour coupler différemment les éléments en vue de l'obtention de tensions diverses.

Les câbles connectant les génératrices aux appareils à essayer doivent être soigneusement tendus sur isolateurs, étiquetés de distance en distance et disposés de manière à ne pas occasionner d'accidents. Il faut éviter rigoureusement de laisser traîner les fils de connexion sur le sol. Le mieux est d'introduire ceux-ci dans des caniveaux faciles à visiter et de les faire aboutir à des bornes près des machines à examiner. Avec les courants continus, on a soin de distinguer les bornes et les conducteurs de polarités contraires par des teintes différentes ou tout autre artifice.

Il faut prévoir des moyens commodes de transport et de fixation des machines à essayer.

Un pont roulant est indispensable pour un laboratoire établi dans un atelier de construction.

La plate-forme d'essai comporte une double série de rainures transversales permettant d'attacher solidement, par des boulons, les coulisseaux qui reçoivent les machines et qui sont pourvus de tendeurs pour les courroies. La plate-forme peut être coulée en fonte avec les rainures. Parfois, on noie dans du béton des poutrelles laissant entr'elles les gorges nécessaires pour fixer les coulisseaux-tendeurs, en ayant soin d'éviter les saillies qui exposeraient le personnel à des chutes. Les petites machines peuvent être établies sur des tables solides à pieds entretoisés.

L'installation du laboratoire comprend les instruments de mesure pour le courant continu et les courants alternatifs, ainsi que les accessoires, tels que compte-tours, tachymètres et rhéostats de charge. Dans les usines, ces derniers sont souvent des résistances liquides contenues dans des tonneaux.

Une salle doit être affectée à l'essai des diélectriques sous haute tension. Il est prudent d'interposer un transformateur séparateur, à rapport de réduction 1 : 1, entre l'alternateur et le primaire du transformateur à haut voltage qu'il alimente. Ce dernier appareil, isolé dans l'huile, doit pouvoir donner au moins 100000 volts par degrés successifs. Il faut prévoir des mesures spéciales pour éviter les accidents. Une bonne précaution est de placer le transformateur élévateur et les pièces à essayer dans une cage en treillis dont la porte commande le circuit primaire, de telle sorte que le transformateur ne peut fonctionner qu'après fermeture de l'issue, par laquelle l'opérateur sort quand il a mis tout en ordre pour l'expérience.

Certains laboratoires possèdent des batteries de tension pour l'épreuve des diélectriques et la graduation des voltmètres. Avec de petits éléments secondaires à deux ou trois plaques, placés sur des lames de verre portées par des isolateurs dans des armoires métalliques, on arrive à des tensions élevées sans trop grands frais. Plusieurs installations disposent ainsi d'une tension continue de 10000 volts, qu'il est facile de contrôler en mesurant séparément les divers groupes d'éléments de la série.

Les laboratoires d'usine doivent autant que possible être situés entre les ateliers de construction et la sortie. Il faut les mettre à l'abri des courants d'air, afin que les opérateurs soient dans des conditions de travail favorables.

Commutateurs et clefs. — Les commutateurs et clefs sont des appareils accessoires d'un emploi très fréquent dans les mesures électriques. Ils servent à combiner diversement différents circuits ou à relier entr'elles les parties d'un même circuit.

Il importe que la résistance électrique des contacts établis au moyen de ces appareils soit aussi faible que possible. A cet

point de vue, on peut ranger ceux-ci dans les trois classes suivantes.

1) *Commutateurs à mercure.* Les fils à réunir plongent dans des godets remplis de mercure et les communications s'établissent d'un godet à l'autre au moyen de cavaliers en cuivre décapés et amalgamés aux extrémités. Pour amalgamer le cuivre, on le frotte avec du mercure dans une solution de nitrate de ce métal. Le platine peut être amalgamé électrolytiquement dans un tel bain. Grâce à l'amalgamation, les liaisons sont aussi intimes que possible. On fait usage de godets en porcelaine disposés dans les trous d'une planchette en bois ou, plus simplement, d'une plaque de paraffine dans laquelle on creuse des cavités pour le mercure.

Dans les clefs suivantes, où la jonction s'établit entre deux pièces métalliques solides, la résistance électrique des contacts est plus considérable; de plus, elle est très variable avec la pression exercée sur les pièces et l'état de leur surface. Cependant on les emploie de préférence aux commutateurs à mercure, qui entraînent des pertes de ce métal et se salissent rapidement. Il faut avoir soin de ne jamais ouvrir un circuit où passe un courant intense au moyen d'un commutateur à mercure, car il se produirait des projections mercurielles.

2) *Commutateurs à frottement.* Les dispositifs à frottement les plus usités sont le commutateur à manette, la clef à couteau et le commutateur à broches.

Dans le premier, un levier métallique, manœuvré à l'aide d'une manette, peut tourner autour d'un axe; dans ce mouvement, le levier glisse en frottant sur une série de blocs en laiton, disposés circulairement sur un support isolant en bois ou en ébonite. Ce système permet de relier un fil aboutissant au levier successivement aux divers conducteurs attachés aux blocs. Afin d'éviter l'amenée du courant à la lame par le pivot même de son support, on fait appuyer un prolongement du levier sur un empâtement de ce dernier. Cet arrangement procure une surface de contact bien nette et soulage l'axe en équilibrant l'effort exercé par le grand bras du levier, fig. 69.

La clef à couteau comporte une lame de cuivre mobile autour d'une de ses extrémités et qu'on amène entre deux paires de mâchoires métalliques reliées aux conducteurs à mettre en

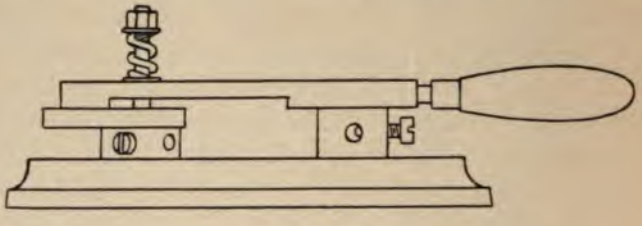


Fig. 69.

communication, fig. 70. Ce système, très employé pour les courants intenses, permet d'obtenir de larges surfaces de contact (5 mm² par ampère) et de renouveler aisément les pièces altérées par les étincelles d'extra-courant. L'axe de rotation ne fait pas partie du circuit électrique.

Fig. 70.

Dans le commutateur à broches on réunit les fils aboutissant à des blocs de laiton par l'intermédiaire de fiches métalliques, analogues à celles des boîtes de résistances.

3) *Commutateurs à pression*. Ils sont constitués par une lame métallique qu'on abaisse sur un buttoir pour fermer le circuit. Ces clefs demandent un certain entretien, à cause des étincelles qui, au moment de la rupture du courant, jaillissent entre les surfaces de contact et les oxydent. Bien que ces surfaces soient garnies de platine, les commutateurs considérés ne conviennent pas pour les courants intenses. Il est nécessaire

de nettoyer fréquemment les grains de platine des clefs à pression, car les anomalies observées dans les mesures sont souvent dues à des contacts imparfaits.

Quand un isolement élevé est requis, les clefs sont montées sur ébonite et les bornes d'attache sont portées par des colonnettes de même substance, afin de réduire autant que possible les dérivations de courant. On creuse parfois des cannelures dans les colonnettes, pour allonger le parcours de l'électricité le long de celles-ci. Il faut éviter la lumière et l'humidité, qui acidifient l'ébonite en favorisant l'oxydation superficielle du soufre.

Fig. 71.

On peut classer les clefs comme ci-après, suivant le rôle qu'elles jouent dans les circuits électriques.

Les *clefs d'interruption* ou *interrupteurs* s'emploient pour ouvrir ou fermer à volonté un circuit. Une lame élastique pouvant être abaissée contre un buttoir résout le problème, fig. 71.

Les *clefs d'inversion* ou *inverseurs* servent à envoyer le courant d'une pile dans un circuit, tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire. Un modèle très répandu est représenté schématiquement dans la fig. 72 et en perspective dans la fig. 73. Les extrémités du circuit sont reliées à deux lames élastiques en laiton durci, tandis que les deux pôles de la pile sont raccordés à deux traverses rigides, situées l'une au-dessous et l'autre au-dessus des lames. Normalement, ces dernières appuient contre la traverse supérieure ; le circuit est alors fermé sur lui-même et la pile est isolée. En abaissant alternativement les lames, on envoie dans le circuit des courants de sens

inverses. On peut maintenir les lames abaissées par des cames en ébonite. Il faut prendre garde d'intervertir les connexions indiquées, car la pile serait mise en court-circuit par la traverse supérieure.

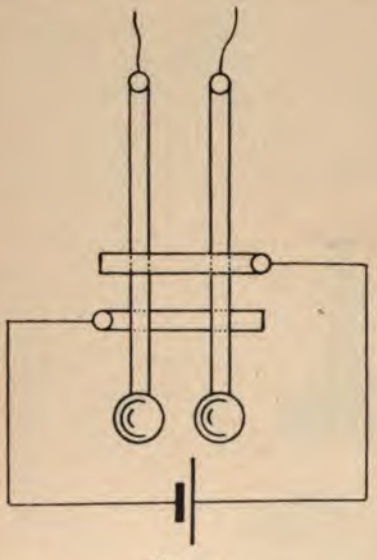


Fig. 72.

Fig. 73.

Les *clefs de décharge* sont destinées à provoquer la charge et la décharge d'un condensateur. La clef de Sabine, fig. 74,

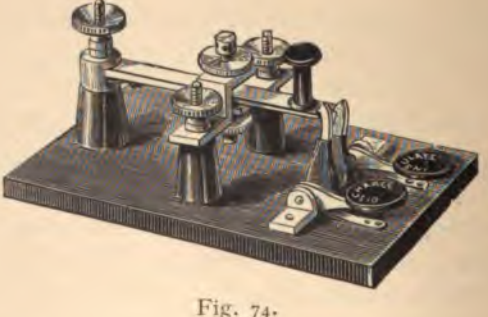


Fig. 74.

comporte une lame poussée vers le haut par un ressort et

mobile entre deux traverses rigides. L'une des armatures du condensateur est raccordée à la lame, tandis que l'autre communique avec la pile et le circuit de décharge connectés, d'autre part, respectivement à la traverse inférieure et à la traverse supérieure. Grâce à deux becs portés par des leviers qui pivotent autour d'un même axe et situés à des hauteurs différentes,

Fig. 75.

on peut isoler la lame ou la maintenir en rapport avec la traverse inférieure. Si l'on dégage les becs, la lame se relève contre la traverse supérieure sous l'action du ressort. L'abaissement de la lame détermine la charge du condensateur, la position moyenne correspond à l'isolement des armatures et le relèvement produit la décharge. La fig. 75 montre une clef de décharge plus simple à un levier, construite par MM. Siemens et Halske.

Soudures. — Il arrive fréquemment, dans la préparation des expériences, qu'on doive souder deux pièces de cuivre pour les réunir ou assurer la conductance du contact.

Les petites soudures se font au fer à souder, qui est en réalité un bloc de cuivre soutenu par une tige en fer. Les grandes soudures se préparent plus facilement au chalumeau à benzine ou à gaz.

Lorsqu'il ne s'agit que d'obtenir un contact intime entre les pièces à joindre, on adopte ordinairement la *soudure grasse,* faite avec un alliage à proportions sensiblement égales de plomb et d'étain. Les surfaces préalablement grattées sont décapées avec une solution de chlorure de zinc. Le fer à souder chauffé est frotté avec un peu de soudure sur un

morceau de sel ammoniac pour étamer le bloc, puis on appuie avec le fer le bâton de soudure sur les objets à réunir. La soudure, en fondant, s'infiltre par capillarité dans le joint. On asperge alors d'eau, pour enlever l'excès de chlorure de zinc et refroidir. Pour les pièces de cuivre délicates et les fils, avec lesquels les résidus de chlorure pourraient provoquer des accidents subséquents, on préfère remplacer ce sel par de la colophane en vue du décapage des surfaces. On vend même des bâtons de soudure pourvus à cet effet d'une âme de résine. Il faut éviter soigneusement le contact de la soudure avec le mercure, qui la dissout. Lorsqu'on doit souder des masses importantes, on commence par les étamer avec de la soudure comme ci-dessus; on rapproche ensuite les pièces préparées et on les chauffe au fer ou au chalumeau jusqu'à réunion par fusion des couches appliquées.

Si les objets doivent supporter des efforts, tels qu'un pliage, et si la soudure ne peut être consolidée par une jonction mécaniquement résistante, il convient de recourir à la *soudure forte* ou *brasure*, faite avec un alliage de cuivre et de zinc. Les pièces à joindre, réunies provisoirement par un fil métallique mince après avoir été nettoyées, sont saupoudrées de borax mêlé à des fragments de soudure. On chauffe au chalumeau jusqu'à ce que la soudure fonde et imprègne les joints par capillarité. L'objet refroidi est nettoyé à la lime ou à la fraise.

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Classification des appareils utilisés à la mesure des courants. — Le plus grand nombre des mesures électriques comportent la détermination de l'intensité d'un courant ou la simple constatation du passage d'un courant. Delà l'importance des appareils destinés à la mesure des courants. Ces appareils sont basés sur l'un quelconque des effets du courant, à savoir : l'*effet électromagnétique* ou action d'un courant sur un aimant, l'*effet électrodynamique* ou action d'un courant sur un courant, l'*effet chimique* ou électrolyse et l'*effet thermique* régi par la loi de Joule.

La mesure de la quantité d'électricité qui traverse un circuit est liée à celle de l'intensité du courant. Ainsi, le voltamètre permet d'estimer la quantité d'électricité et, par une simple division par le temps, fait connaître l'intensité moyenne du courant.

Nous ne séparerons donc pas ces deux genres de mesures. Nous ne reporterons dans un chapitre spécial que les coulombmètres, qui poursuivent un objectif tout particulier.

Description des galvanomètres à aimant fixe. — Nous

étudierons, en première ligne, les galvanomètres qui utili
l'action d'un aimant fixe sur une bobine mobile, appelée c
galvanométrique ou multiplicateur, parcourue par le cou
à évaluer. Ces appareils ont reçu de nombreuses applicat
dans les laboratoires industriels. Le principe en a été ind
par Maxwell, mais c'est à MM. Deprez et d'Arsonval q
doit la première forme pratique de ces instruments.

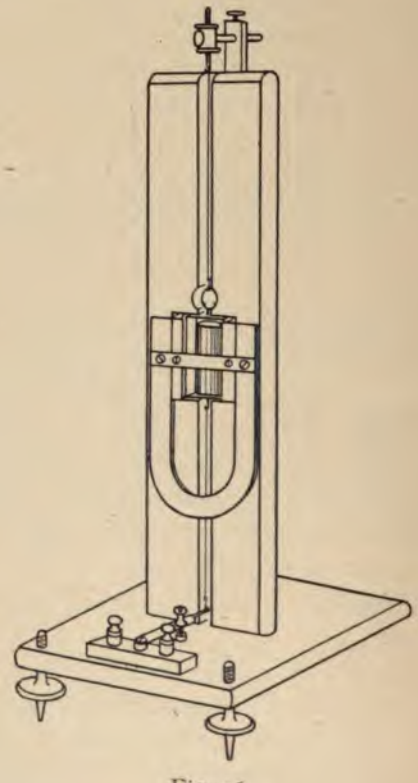


Fig. 76.

La fig. 76 représente un modèle simple, que l'auteur a ét
en vue d'en faciliter la construction par les élèves de l'Inst
Montefiore. Une planchette verticale porte deux aimant
fer à cheval pourvus de pièces polaires concaves embras

un noyau tubulaire. Celui-ci est destiné à ménager un entrefer cylindrique d'épaisseur constante, à travers lequel les lignes de force rayonnent uniformément. Le flux magnétique, normal aux surfaces polaires dans l'entrefer, affecte dans le noyau la courbure de celui-ci. Il convient d'arrondir les bords latéraux des pièces polaires pour éviter que les lignes de force ne s'y accumulent. Dans l'entrefer est suspendue une bobine entre deux fils métalliques droits qui lui amènent le courant. Il est à conseiller d'aplatir les fils de suspension en vue de diminuer leur constante de torsion et de favoriser le rayonnement de la chaleur qui s'y développe par effet Joule. Les spires de la bobine sont empâtées de vernis à la gomme-laque afin de se soutenir sans déformation. Le fil de suspension supérieur aboutit à une tête de torsion. Le fil inférieur est attaché à une lame élastique, sur laquelle appuie une vis de pression permettant de varier la tension des fils et, par suite, la sensibilité de l'instrument. Les fils, en bronze phosphoreux, ont 22 cm de longueur et 0,15 mm de diamètre avant l'aplatissement ; leur résistance totale vaut 1,5 ohm. Leurs extrémités sont soudées. Un miroir, fixé par des griffes, sert aux lectures par la méthode de réflexion. Les pièces d'attache des fils de suspension, ainsi que les bornes de l'appareil, sont montées sur des blocs en ébonite, le bois n'offrant pas une résistance d'isolement suffisante.

Dans le dispositif précédent, le centre de gravité de l'équipage mobile ne se trouve généralement pas sur l'axe de la suspension. Si celle-ci présente une légère obliquité par rapport à la verticale, le centre de gravité remonte quand la bobine tourne dans un sens, tandis qu'il descend pour un déplacement inverse; d'où des couples directeurs parasites qui diffèrent avec le sens de la déviation. Pour supprimer cet inconvénient et réduire la hauteur de la suspension, l'auteur a disposé la bobine entre deux boudins de fil métallique. Le ressort supérieur est en bronze phosphoreux et fournit le couple de torsion. Son axe est occupé par un fil de cocon qui supporte le poids du multiplicateur. Le ressort inférieur, en cuivre doux, ne sert qu'à conduire le courant ; il est assez souple pour que le centre de

gravité de la bobine se place sur le prolongement du fil de cocon.

La fig. 77 montre un appareil de l'espèce qui, dans sa forme primitive, n'était pas pourvu des pièces polaires courbes utilisées actuellement pour régulariser le champ magnétique. Les boudins ont 10 mm de diamètre et sont faits en fil de 0,15 mm. La longueur développée mesure 1 m pour le boudin supérieur et 3 m pour le boudin inférieur, ce qui correspond à une

Fig. 77.

résistance de 6 ohms. Ce mode de suspension donne au galvanomètre une grande sensibilité et évite la torsion permanente qui subsiste, après une déviation trop forte, lorsqu'on emploie des fils droits de faible longueur.

Les fig. 78 et 79 représentent un autre modèle de galvanomètre à bobine mobile et double suspension à boudin, construit sur les indications de l'auteur. Deux systèmes de barreaux droits aimantés sont réunis par une culasse inférieure fixée sur un socle en ébonite à vis calantes. L'aimant en fer à cheval ainsi constitué porte deux demi-pièces polaires, comme

ıontre la vue en projection horizontale. La bobine, munie son miroir, est attachée, en haut, à un boudin de bronze ourant un fil de cocon et, en bas, à un boudin de cuivre. ; extrémités éloignées de ces ressorts sont fixées à des ılisses en ébonite, qui glissent dans des rondelles de même ›stance fermant les bouts d'un tube de laiton fendu. Ce e soutient le noyau en fer et les demi-pièces polaires tinées à compléter le circuit magnétique de l'appareil. La te du tube, assez large pour livrer passage à la bobine et a suspension, est obturée par une glace allongée. Il suffit dapter la pièce décrite sur l'aimant, à l'aide de deux vis,

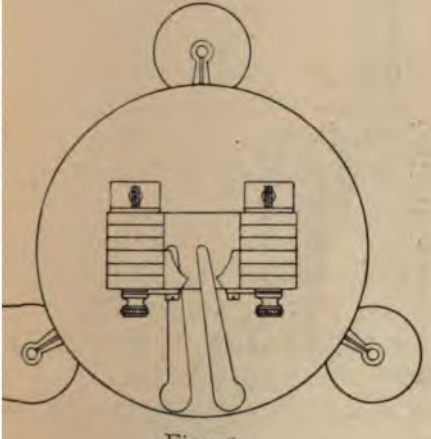


Fig. 78.

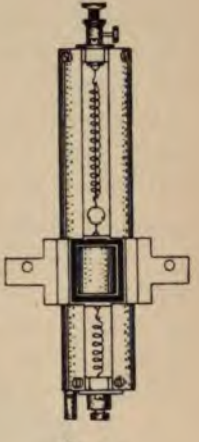


Fig. 79.

ı ı que le galvanomètre soit monté. La borne inférieure et piton relié par un fil isolé au bouton de réglage terminant le s ort supérieur viennent appuyer sur deux lames élastiques communication avec les serre-fils disposés sur le socle ant de l'instrument.

- auteur a rendu le galvanomètre Deprez et d'Arsonval dif- ntiel par le dispositif suivant, fig. 80. Le cadre mobile n prend deux bobines semblables suspendues à un fil de on. Autour de ce dernier se trouve un ressort métallique à ı clin qui donne accès au courant dans les deux enroulements.

Les courants dérivés en sens inverses à travers ceux-ci sortent par des fils tendus parallèlement et reliés à des bornes distinctes. Si les courants partiels sont égaux, les couples électromagnétiques développés se font équilibre, à condition que les bobines se déplacent dans des régions du champ magnétique de même intensité. Afin de satisfaire à cette nécessité, les aimants sont munis de pièces polaires mobiles, dont la position peut être réglée par des vis micrométriques. Grâce à cet artifice, l'équilibre peut être obtenu même si les deux bobines

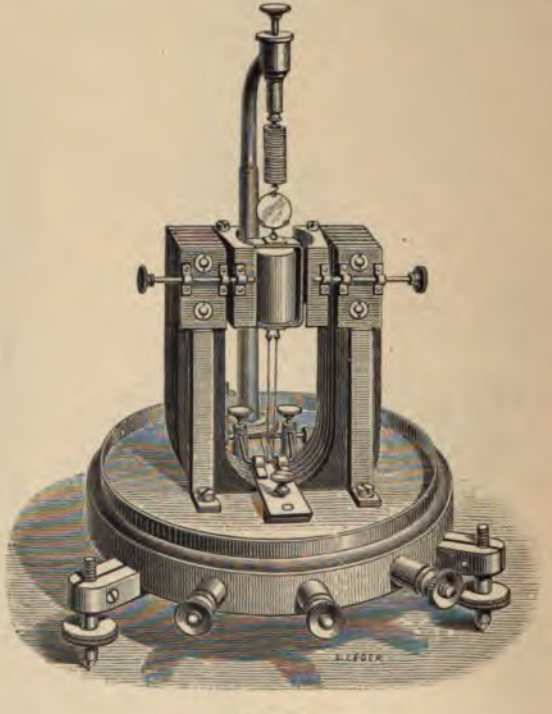


Fig. 80.

ne sont pas tout à fait identiques, ce qui est le cas général. Pour éviter des déplacements latéraux de l'équipage mobile, occasionnés par une attraction inégale des pièces polaires sur les courants voisins, il convient d'enrouler la plus grande partie des deux bobines à l'aide de deux fils jointifs et de ne laisser

qu'un petit nombre de spires écartées, sur lesquelles s'exerce l'action régulatrice des pièces polaires.

En 1888, l'auteur, ayant à étudier des enregistreurs à bobines mobiles de très petites dimensions, supprima le noyau central et fit usage de pièces polaires plates et très rapprochées, laissant entr'elles un champ magnétique sensiblement uniforme. MM. Ayrton et Mather ont employé, indépendamment, la même disposition, qui conduit à des équipages mobiles très légers. On peut démontrer que la bobine qui donne le moment d'inertie minimum avec la sensibilité maxima est figurée, en coupe horizontale, par deux cercles tangents.

Dans le modèle de galvanomètre des électriciens cités ci-dessus, une bobine semblable, de forme allongée, est logée dans un tube en argent, qui sert d'amortisseur grâce aux courants induits développés par sa rotation dans le champ de l'aimant. La bobine est suspendue à un fil plat en bronze phosphoreux, dont la section mesure 0,27 mm sur 0,05 mm, dans un cylindre de laiton pourvu d'une glace à l'endroit du miroir mobile. Elle est reliée inférieurement à un boudin souple en bronze. Un ressort plat, muni d'une vis de réglage, permet de caler le tube d'argent dans le cylindre de laiton, pour empêcher le bris de la suspension pendant le transport. Le cylindre de laiton se glisse entre les pôles de l'aimant et les connexions électriques s'établissent automatiquement par des ressorts. On peut ainsi enlever facilement l'équipage mobile et le rem-

Fig. 81.

placer par un autre de résistance différente, suivant la nature des mesures à exécuter, fig. 81.

Le modèle de galvanomètre construit par MM. Siemens et Halske, fig. 82 et 83, comporte un système inducteur formé de six aimants en fer à cheval réunis par deux pièces polaires. Un noyau de fer placé à l'intérieur de la bobine augmente et régularise le champ magnétique, en même temps qu'il assure la proportionnalité de l'appareil. La bobine, très légère, est en fil de cuivre. Sa hauteur est à sa largeur dans le rapport de 6 à 5.

Fig. 82.

Fig. 83.

Le courant arrive au cadre par un conducteur de suspensio plat en bronze phosphoreux ; il en sort par un boudin e argent. Le multiplicateur est pourvu d'une carcasse en cuivr électrolytique, fendue à la partie inférieure et dont le circu est fermé par un fil métallique choisi de manière à procurer u amortissement convenable. L'équipage mobile et le noya peuvent être enlevés en une fois. Un dispositif spécial perme de caler la bobine pour le transport. Quelquefois l'aluminiu

est employé pour la carcasse, mais, indépendamment de la difficulté de soudure de cette matière, le cuivre électrolytique offre l'avantage d'une meilleure conductibilité et de l'absence de fer. L'aluminium contient assez souvent des impuretés magnétiques, qui provoquent des déplacements parasites.

Les aimants utilisés dans les galvanomètres doivent rester aussi constants que possible. Dans ce but, on fait usage d'acier au tungstène, trempé vers 825° C et vieilli artificiellement par le recuit. La trempe doit être bien uniforme, car les endroits mal trempés ont une tendance à devenir des points neutres et à amener entr'eux des pôles conséquents. L'intensité d'aimantation habituelle est voisine de 500 C. G. S. Pour diminuer la force démagnétisante, le rapport de la reluctance de l'entrefer à celle de l'aimant proprement dit doit être faible. (1) Avec des entrefers très étroits on atteint des champs magnétiques d'une intensité peu différente de 1 000 gauss.

Il est important de se servir de cuivre à haute conductibilité pour le fil des bobines. La maison Siemens et Halske soumet, à cet effet, le cuivre à deux électrolyses successives, pour le débarrasser le mieux possible des impuretés.

Théorie des galvanomètres à aimant fixe. — Lorsqu'un courant est envoyé dans le cadre mobile disposé parallèlement à la ligne des pôles de l'aimant, la bobine tend à se placer normalement à cette ligne, de manière à embrasser le plus grand flux magnétique possible ; mais la torsion de la suspension exerce un couple antagoniste croissant avec l'angle de déviation.

Dans l'évaluation du moment du couple électromagnétique, il y a lieu de distinguer le cas des bobines à noyau, tournant dans un champ radial, et le cas des bobines sans noyau, se mouvant dans un champ uniforme.

En appelant $\mathcal{H}$ l'intensité moyenne du champ dans lequel se déplacent les côtés verticaux du cadre de hauteur h et de lar-

(1) Éric Gerard : *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. XIV. — Gauthier-Villars, Paris.

geur l, i l'intensité du courant, n le nombre de spires du multiplicateur, la force électromagnétique est $i\mathcal{H}hn$ dans la première hypothèse et, comme elle est normale au plan des spires, le couple vaut $i\mathcal{H}hnl = i\mathcal{H}sn$, s étant la surface moyenne d'une spire. D'autre part, le moment du couple antagoniste peut, si la déviation α est faible, être représenté par $c\alpha$, c étant la constante de torsion de la suspension.

L'angle d'équilibre satisfait à la condition

$$i\mathcal{H}sn = c\alpha,$$

d'où l'on tire

$$i = \frac{c\alpha}{\mathcal{H}sn} = A\alpha.$$

Le facteur $A = i/\alpha$ s'appelle *facteur de réduction* du galvanomètre. C'est le courant correspondant à l'unité d'angle.

Un autre moyen de comparaison des galvanomètres consiste à indiquer leur *formule de mérite*, définie par le courant qui produit un déplacement de 1 mm sur une échelle située à 1 m de distance.

Quand il s'agit d'appareils à lecture par réflexion, on considère ordinairement, sous le nom de *constante*, l'inverse du facteur de réduction : $k = 1/A$. La constante représente la déviation angulaire due à l'unité d'intensité de courant. On l'exprime souvent par le nombre de divisions de l'échelle rapporté au micro-ampère, en évaluant les résistances en mégohms ou les forces électromotrices en microvolts.

En discutant les mesures faites avec les galvanomètres, il importe de bien préciser la signification donnée à la constante. Dans les méthodes de comparaison, la constante du galvanomètre s'élimine, de sorte qu'il n'y a aucune difficulté. Mais, dans les méthodes de réduction à zéro, l'erreur de lecture, que comporte le relevé du nombre de divisions δ accusé par le galvanomètre, correspond à une variation du courant i traversant celui-ci donnée par la relation

$$di = \frac{d\delta}{k},$$

où i est, en général, le résultat de la division d'une force électromotrice en volts par une résistance en ohms, de sorte que k vaut alors 10^6 fois la constante définie par rapport au microampère. Dans les mesures absolues, il est nécessaire de revenir aux angles évalués en radians. Si l'on connaît la distance du miroir à l'échelle en divisions de celle-ci, il est facile de calculer l'angle correspondant à un nombre de divisions déterminé.

La constante d'un galvanomètre mesure sa *sensibilité*. L'*exactitude* de l'appareil, qu'il ne faut pas confondre avec la sensibilité, est, dans des conditions d'emploi données, l'inverse de l'erreur relative de mesure, c'est-à-dire le rapport de la déviation observée à la plus petite déviation appréciable.

On détermine la constante par une expérience préalable, consistant à noter la déviation que provoque un courant d'intensité connue.

Dans le cas où, en l'absence de noyau, la bobine galvanométrique se meut dans un champ uniforme, dont les lignes de force sont des droites normales aux plans polaires en regard, le moment du couple électromagnétique est le produit de la force $i\mathcal{H}hn$ par le bras de levier du couple, qui est $l \cos \alpha$ attendu que la force est perpendiculaire à la direction du champ. On a donc

$$i\mathcal{H}sn \cos \alpha = c\,\alpha$$

Par suite,

$$i = \frac{c}{\mathcal{H}sn} \frac{\alpha}{\cos \alpha}.$$

La complexité de cette fonction est la raison qui a engagé l'auteur à abandonner ce système. On ne peut négliger le paramètre $\cos \alpha$ que si l'on se sert de l'appareil entre des limites de déviation très restreintes. Il est toutefois possible d'étudier une courbure des pièces polaires propre à fournir un champ dont la variation compense l'effet de l'obliquité du cadre par rapport aux lignes de force.

Dans tous les galvanomètres examinés, on doit donner aux aimants la plus grande puissance possible. Dans certains cas spéciaux on a recours à des électro-aimants pour accroître l'intensité du champ et, partant, le couple électromagnétique.

Mais il est difficile de maintenir ainsi l'intensité du champ invariable, à cause de l'hystérésis des noyaux.

On ajuste parfois la constante des galvanomètres au moyen d'un shunt magnétique, consistant en un biseau en fer qu'on peut glisser plus ou moins sur les pôles de l'aimant, de façon à dériver une partie variable du flux de ce dernier.

Il convient d'approprier la résistance des galvanomètres à celle des circuits dans lesquels ils doivent être introduits. Il est facile à démontrer qu'on obtient la déviation maxima lorsque la résistance du galvanomètre est voisine de celle du circuit extérieur.

Supposons le volume du cadre donné et négligeons les interstices entre les fils, ainsi que l'espace occupé par l'isolant. En appelant r la résistance d'une spire unique qui remplirait tout le volume disponible, la résistance de la bobine est $R = n^2 r$ dans le cas de n spires. Pour une force électromotrice e et une résistance extérieure ρ, l'intensité du courant est

$$i = \frac{e}{\rho + R} = \frac{e}{\rho + n^2 r}$$

et le couple électromagnétique

$$i \mathcal{H} s n = \frac{\mathcal{H} s n e}{\rho + n^2 r}$$

est maximum quand

$$\rho = n^2 r.$$

Cette condition n'est jamais rigoureusement applicable, mais si l'on dispose de plusieurs galvanomètres, on choisit l'appareil dont la résistance concorde le mieux avec celle du circuit sur lequel on expérimente.

Lorsqu'on veut mesurer les courants minimes qui passent dans les diélectriques, la résistance à donner aux bobines des galvanomètres doit être aussi grande que possible.

Il en est autrement quand il s'agit de l'évaluation de petites différences de potentiel. Les fils de suspension doivent alors être aussi minces que possible, pour réduire le couple de torsion, et un raisonnement analogue au précédent montre

que la résistance des bobines doit être égale à celle des fils de support, pour que l'effet électromagnétique soit maximum.

La conclusion est qu'un galvanomètre Deprez et d'Arsonval doit être muni de deux équipages mobiles ayant, par exemple, des résistances de 10 ohms et 200 ohms. On a vu que, dans les appareils de MM. Ayrton et Mather, ainsi que dans ceux de MM. Siemens et Halske, le cadre mobile peut s'enlever d'un bloc avec sa suspension pour faciliter le remplacement.

Les galvanomètres à bobine mobile ont l'avantage précieux d'être peu influencés par les courants électriques et les aimants voisins, dont les champs magnétiques sont faibles dans l'espace où se meut l'enroulement, comparés à celui des aimants inducteurs. En outre, le mouvement de la bobine peut être aisément amorti, grâce aux courants induits qui se développent dans celle-ci pendant son déplacement dans le champ de l'entrefer. On est maître de varier le couple amortisseur, en modifiant la résistance du circuit relié à l'appareil. Comme cette résistance est souvent imposée par les conditions d'expérience, on réalise quelquefois un amortissement invariable en enroulant la bobine sur un cadre en aluminium sans soudure ou en la plaçant dans un tube en cuivre ou en argent. On peut fendre le cadre ou le tube et le fermer par une languette métallique lorsque l'amortissement supplémentaire est désiré.

Pour les deux raisons que nous venons d'indiquer, l'usage des galvanomètres à bobine mobile s'est rapidement répandu dans les laboratoires électrotechniques.

La forme à donner à la bobine n'est pas indifférente. A surface égale, la forme carrée est, parmi les formes rectangulaires, celle qui présente le périmètre minimum et qui procure le plus grand couple électromagnétique pour une résistance électrique déterminée. Par contre, une bobine carrée a un moment d'inertie relativement considérable, ce qui rend l'amortissement des oscillations plus difficile. Pour les emplois usuels, on cherche à rendre aussi grand que possible le rapport du moment du couple déviant, qui est proportionnel à la largeur de la bobine, au moment d'inertie, qui varie proportionnellement au carré de cette dimension. On est donc amené à réduire la largeur.

La mise en station des galvanomètres s'opère en observant les indications données à propos de la description des systèmes de lecture par réflexion. Pour éliminer les petites erreurs de réglage de l'échelle par rapport au miroir, on intervertit le sens du courant à mesurer, de manière à obtenir des déviations α et α' de part et d'autre de la position d'inactivité. Si l'ajustement était parfait, on aurait $\alpha = \alpha'$. Quand il y a une différence, la valeur à adopter est $(\alpha + \alpha')/2$.

Avant de se servir d'un appareil, il est nécessaire de s'assurer de la proportionnalité des déviations aux courants. Pour cela, on fait passer dans le cadre multiplicateur des courants d'intensité croissant dans un rapport connu. On construit un diagramme en portant en abscisses des valeurs proportionnelles aux courants et en ordonnées les déviations correspondantes. Si la proportionnalité existe, la ligne obtenue est une droite. Dans le cas contraire, la courbe empirique trouvée montre les corrections à apporter aux résultats d'observation.

Avec les galvanomètres de faible résistance, les effets thermo-électriques produisent parfois des déviations gênantes. Il faut avoir soin d'employer le même métal pour toutes les parties du circuit, afin que les différences de température ne puissent pas donner lieu à des couples thermo-électriques.

Shunts. — Un galvanomètre construit pour mesurer de très faibles courants peut également servir à la détermination de courants intenses, si l'on dispose entre ses bornes une résistance connue, ou *shunt*, qui absorbe la majeure partie du courant à évaluer.

Si g désigne la résistance du galvanomètre, s celle du shunt, I le courant total, le courant dans l'appareil de mesure a pour intensité

$$i = \mathrm{I}\,\frac{s}{s+g} = \frac{\alpha}{k},$$

d'où

$$\mathrm{I} = \frac{s+g}{s}\,\frac{\alpha}{k}.$$

Le rapport $(s + g)/s = m$ s'appelle *pouvoir multiplicateur* du

shunt. Pour que i soit égal à $^1/_{10}$, $^1/_{100}$ ou $^1/_{1000}$ de I, il faut que s vaille $^1/_9$, $^1/_{99}$ ou $^1/_{999}$ de g. Les galvanomètres sont fréquemment pourvus d'une boîte de shunts contenant trois bobines ayant les résistances relatives indiquées.

L'adjonction d'un shunt a pour effet de diminuer la constante du galvanomètre shunté dans le rapport 1 à $s/(s+g)$. Il est à remarquer que la résistance entre les bornes de l'appareil passe alors de g à $gs/(g+s) = g/m$. S'il est nécessaire de maintenir la résistance du circuit invariable, on ajoute une *résistance de compensation* égale à

$$g - \frac{gs}{g+s} = \frac{g^2}{g+s} = g\frac{m-1}{m}.$$

Lorsque les courants à mesurer sont très intenses, on utilise comme shunt une barre ou mieux une bande conductrice, reliée au circuit à l'essai par ses extrémités et sur laquelle on soude, en deux points intermédiaires, les fils allant au galvanomètre. Pour changer la constante de l'appareil ainsi shunté, l'on insère des résistances additionnelles en série avec le cadre multiplicateur. Soit k' la constante du galvanomètre shunté, k étant celle de l'instrument employé isolément. La résistance du shunt pouvant être négligée vis-à-vis de celle du galvanomètre, on a

$$k' = k\frac{s}{g}.$$

Si l'on ajoute une résistance r en série avec la bobine, on obtient une nouvelle constante

$$k'' = k\frac{s}{g+r}.$$

En faisant varier r, on étend convenablement la limite des courants mesurables.

Si l'on dispose de résistances étalons de 1, 0,1, 0,01, 0,001 et 0,0001 ohm, il n'est pas difficile, en dérivant sur ces shunts un galvanomètre sensible en série avec des résistances variables, d'arriver à mesurer des courants de 0,001 à 10 000 ampères.

L'emploi d'un shunt exige que le rapport de la résistance de

ce dernier à celle du galvanomètre reste invariable. Il faut donc que l'un et l'autre soient en même métal et placés dans des conditions identiques de température. En outre, il convient que le courant ne les échauffe pas sensiblement, vu la difficulté d'obtenir des échauffements égaux. Afin d'éviter des corrections pour la température, on peut adopter des bobines galvanométriques et des shunts en maillechort ou en manganine, mais la grande résistivité de ces alliages ne permet pas de réaliser des galvanomètres très sensibles.

Si la densité du courant qui traverse le shunt est considérable, on empêche une élévation anormale de température en plongeant celui-ci dans un bain d'huile minérale, qu'on refroidit, au besoin, par une enveloppe extérieure d'eau ou de glace.

On construit actuellement des shunts, dits *universels*, d'après une disposition suggérée par M. Ayrton. Soient 3 résistances s_1, s_2, s_3, telles que $s_1 : (s_1 + s_2) : (s_1 + s_2 + s_3) :: 10 : 100 : 1000$, fig. 84. Suivant qu'une fiche est intercalée en 1, 2 ou 3, on a les

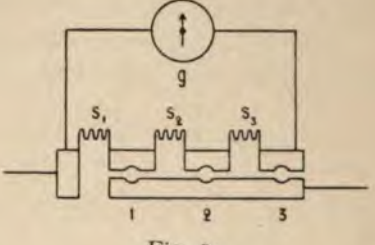


Fig. 84.

pouvoirs multiplicateurs

$$m_1 = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + g}{s_1},$$

$$m_2 = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + g}{s_1 + s_2},$$

$$m_3 = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + g}{s_1 + s_2 + s_3}.$$

Par suite, $m_1 : m_2 : m_3 :: 0{,}1 : 0{,}01 : 0{,}001$. Les rapports des pouvoirs multiplicateurs étant indépendants de la résistance

du galvanomètre, ces shunts s'adaptent à tous les appareils, pourvu que leur ordre de résistance convienne.

Un avantage de la combinaison précédente consiste en ce que, si le galvanomètre est employé pour la décharge d'un condensateur, la résistance totale de son circuit reste invariable, de même, par suite, que l'amortissement. Il n'en est pas ainsi quand on utilise le dispositif dans le circuit d'une pile, dont le courant change avec le shunt choisi. Toutefois l'amortissement peut encore être considéré comme constant si la résistance en série avec la pile est très grande relativement à celle du shunt. Avec des shunts universels en manganine ou autre alliage analogue, la résistance totale $s_1 + s_2 + s_3 + g$ est moins influencée que g par la température et les rapports $m_1 : m_2 : m_3$ demeurent en tous cas pratiquement constants.

Détermination de la constante d'un galvanomètre à l'aide d'un couple étalon. — Lorsqu'un galvanomètre doit être employé à la mesure de courants faibles, seul ou avec des shunts de résistance connue, l'on détermine le nombre de divisions de l'échelle correspondant à un micro-ampère par un des procédés suivants.

Le galvanomètre peut être mis en circuit avec une pile étalon, telle qu'un élément Clark, et une résistance très élevée, 100000 ohms par exemple. Soient g la résistance de l'appareil, ρ celle de l'élément, r la résistance additionnelle, i l'intensité du courant, e la force électromotrice de l'étalon et δ le nombre de divisions lu sur la graduation :

$$i = \frac{e}{\rho + g + r} = \frac{\delta}{k},$$

d'où

$$k = \frac{\delta(\rho + g + r)}{e}.$$

Les résistances doivent être exprimées en mégohms et la force électromotrice en volts, pour que le courant soit exprimé en micro-ampères. La résistance de l'élément et parfois même celle du galvanomètre peuvent être négligées devant r. On

cherche à obtenir la déviation la plus grande possible pour réduire au minimum l'erreur relative de lecture, égale à l'erreur relative qu'elle entraîne sur la constante.

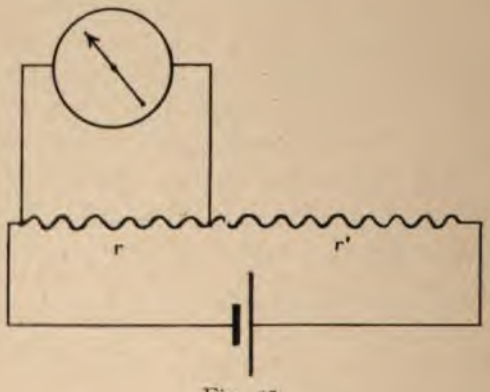


Fig. 85.

Lorsqu'on ne dispose que d'une boîte de résistances allant jusqu'à 10000 ohms, on utilise un élément peu polarisable ou un étalon Clark de grandes dimensions. On dérive le galvanomètre sur une petite résistance r prise dans la boîte, en laissant en circuit avec la pile toute la résistance disponible r', fig. 85. En désignant par i le courant dans le galvanomètre, par I le courant total, par e et ρ la force électromotrice et la résistance de l'élément,

$$i = I\,\frac{r}{r+g} = \frac{e}{\rho + r' + \dfrac{rg}{r+g}}\,\frac{r}{r+g} = \frac{\delta}{k}.$$

Si r et ρ sont petits par rapport à g et r', on peut simplifier en écrivant

$$i = \frac{e}{r'}\,\frac{r}{g} = \frac{\delta}{k}.$$

On choisira r de manière à provoquer la plus grande déviation possible et, suivant l'importance de l'erreur relative qu'on peut commettre dans la lecture du nombre de divisions, on appréciera ce qu'on peut négliger dans la formule.

La disposition qui vient d'être décrite est fréquemment employée pour obtenir une très faible différence de potentiel aux extrémités d'un galvanomètre ou d'un circuit.

Emploi du voltamètre pour le tarage des galvanomètres. — Lorsque les courants à mesurer sont de l'ordre d'un ampère, il est possible de graduer le galvanomètre, pourvu de son shunt, sans connaître sa résistance ni celle du shunt. On détermine la constante du galvanomètre shunté en mesurant séparément l'intensité d'un courant au moyen d'un *voltamètre*.

Il convient de remarquer que la valeur de l'ampère, définie par les lois de l'électrolyse, présente une incertitude d'environ 0,05 pour 100. Si 96540 coulombs correspondent au dépôt d'un équivalent en grammes des divers ions, l'équivalent électrochimique vaut 0,001 118 gr pour l'argent et 0,000 3287 gr pour le cuivre. Les électrolyses du nitrate d'argent fournissent des résultats comparables à 0,03 pour 100 près, tandis que celles du sulfate de cuivre ne donnent guère que 0,1 à 0,3 pour 100.

Voltamètre à argent. Le voltamètre à argent est le plus précis, lorsqu'il est employé dans les conditions suivantes.

La cathode est une capsule en platine d'au moins 10 cm de diamètre et de 4 à 5 cm de profondeur. L'anode est une plaque d'argent pur, de 30 cm^2 de surface et de 2 à 3 mm d'épaisseur pour un courant de 1 ampère; elle est suspendue horizontalement dans l'électrolyte, près du niveau de celui-ci, par un fil de platine passant à travers des trous percés dans les coins de la plaque. Pour prévenir la chute sur la cathode de l'argent désagrégé de l'anode, celle-ci est enveloppée de papier à filtrer maintenu par de la cire à cacheter. Le liquide consiste en une solution neutre de nitrate d'argent, contenant en poids 15 de nitrate pour 85 d'eau.

La résistance du voltamètre varie pendant la durée du passage du courant. En vue d'éviter que ce changement n'exerce un effet trop accentué sur l'intensité du courant, il est utile d'ajouter dans le circuit une résistance additionnelle, de façon que la résistance totale ne soit pas inférieure à 10 ohms.

Pour préparer une expérience, on commence par laver la

capsule de platine à l'acide nitrique, puis à l'eau distillée; on la sèche à chaud et on la laisse refroidir dans un dessicateur avant de la peser. La capsule est alors remplie de solution de nitrate et placée sur un support en cuivre isolé, pourvu d'une borne. L'anode est immergée dans le liquide. On ferme le circuit à l'aide d'une clef et on note l'heure de l'établissement du contact. Le courant est maintenu pendant une demi-heure au moins. La solution est ensuite retirée et la capsule lavée avec de l'eau distillée à la température ordinaire, jusqu'à ce que le liquide de lavage ne soit plus troublé par l'acide chlorhydrique, qui décèle le nitrate d'argent. On rince encore avec de l'eau portée à la température de 70° à 90°C, puis avec l'alcool. On sèche le récipient dans une étuve à air chauffée à 160°C environ. Après refroidissement dans un dessicateur, on pèse de nouveau la capsule. La différence des poids, en grammes, représente l'argent déposé; divisée par le nombre de secondes durant lesquelles le courant a passé et par 0,001 1118, elle exprime l'intensité moyenne en ampères.

Le courant doit être maintenu aussi constant que possible au moyen de la résistance additionnelle et les indications du galvanomètre, intercalé dans le circuit du voltamètre, sont relevées à des intervalles de temps rapprochés pendant l'électrolyse. Ces observations fournissent les éléments d'une courbe qui permet de déterminer la déviation correspondant au courant moyen.

Voltamètre à cuivre. Pour la graduation des galvanomètres industriels, le voltamètre à cuivre est préféré au voltamètre à argent, parce que les substances utilisées sont moins chères et que la manipulation est plus commode.

L'électrolyte est une solution aqueuse de sulfate de cuivre purifié du commerce, dont la densité est comprise entre 1,10 et 1,15. Le liquide est additionné de 5 pour 100 d'acide sulfurique. La présence de cet acide empêche l'altération des électrodes en cuivre, qui se dissolvent à la longue dans une solution neutre. On peut dans le même but remplacer l'acide sulfurique par 5 pour 100 d'alcool.

Les électrodes en cuivre électrolytique sont découpées avec

des appendices permettant la fixation aux attaches et ont au moins 0,5 mm d'épaisseur. On les soutient par des pinces à ressort disposées de manière qu'on puisse régler la surface immergée et détacher facilement les plaques pour la pesée. Les bords des plaques sont arrondis afin d'éviter la formation de dépôts peu adhérents sur les arêtes. Les plaques sont décapées dans l'eau acidulée d'acide nitrique, puis dans une solution d'acide sulfurique ; on les rince alors dans l'eau distillée et dans l'alcool. On les pèse, après les avoir desséchées dans un dessiccateur. Il faut éviter de toucher avec les doigts les parties à immerger, de crainte de nuire au dépôt.

La densité du courant doit être d'environ 1 ampère par dm^2 de cathode. Si le courant est trop intense, le dépôt devient cristallin et peu adhérent. Le courant est réglé à l'aide d'un rhéostat. L'opération dure de 30 minutes à 1 heure.

Lorsqu'on retire les plaques, on les lave à l'eau, légèrement acidulée d'acide sulfurique pour éviter l'oxydation, puis à l'alcool ; on sèche la cathode avant de la repeser.

Le calcul se fait comme dans le procédé précédent, en adoptant 0,0003287 pour l'équivalent électrochimique du cuivre.

Étude balistique du galvanomètre à aimant fixe et à champ radial. Mesure d'une décharge instantanée. — Le voltamètre fournit le moyen d'évaluer une quantité d'électricité qui s'écoule sous forme de courant constant. Si la quantité d'électricité passe brusquement, comme c'est le cas dans la décharge d'un condensateur ou l'extra-courant d'une bobine, la méthode est en défaut. On fait alors passer le courant instantané à travers un galvanomètre et l'impulsion de l'équipage mobile, mesurée par l'élongation lue sur l'échelle, permet de déterminer la quantité d'électricité écoulée.

Avant d'exposer le procédé, il est nécessaire de faire brièvement l'étude des oscillations d'un galvanomètre soumis à l'action d'un couple déviant tel que celui produit par un courant instantané.

L'équation du mouvement s'obtient en remarquant que la variation de force vive du système mobile, dont le moment

d'inertie est I, est égale à la somme algébrique des travaux élémentaires des couples agissants :

$$\frac{d}{dt}\left(\mathrm{I}\,\frac{\omega^2}{2}\right) = \mathrm{I}\,\omega\,\frac{d\omega}{dt} = \Sigma\,\mathrm{C}\,\omega.$$

Or $\omega = d\alpha/dt$, α désignant l'angle de déviation du cadre à un moment quelconque. On a donc

$$\mathrm{I}\,\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma\,\mathrm{C}.$$

Parmi les couples en jeu figurent :

1) le couple accélérateur, qui, pour une valeur instantanée i du courant, est $\mathcal{K}\,s\,n\,i$;

2) le couple retardateur développé par le fil de suspension; il est proportionnel à l'angle de torsion α et peut être représenté par $c\alpha$;

3) les couples amortisseurs dus au frottement du cadre contre l'air et aux courants induits qui se développent dans la bobine mobile par sa rotation dans le champ inducteur.

Le frottement s'annule avec la vitesse ; il peut être considéré comme proportionnel à celle-ci, d'où, pour le couple correspondant, l'expression $f\,d\alpha/dt$.

Pour tenir compte de l'amortissement occasionné par les courants induits, on notera que la force électromotrice d'induction, due à la vitesse angulaire $d\alpha/dt$, est $\mathcal{K}\,s\,n\,d\alpha/dt$; en désignant par R la résistance du circuit et en négligeant la force contre-électromotrice très minime correspondant à la self-induction, on a donc, pour l'intensité momentanée du courant induit,

$$i_1 = \frac{\mathcal{K}\,s\,n}{\mathrm{R}}\,\frac{d\alpha}{dt}$$

et, pour le couple produit par ce courant,

$$\mathcal{K}\,s\,n\,i_1 = \frac{\mathcal{K}^2\,s^2\,n^2}{\mathrm{R}}\,\frac{d\alpha}{dt}.$$

L'équation du mouvement devient ainsi, en faisant passer les couples antagonistes dans le premier membre,

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2}+\left(f+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{R}\right)\frac{d\alpha}{dt}+c\alpha=\mathcal{H} s n i. \qquad (1)$$

Si l'on admet que le moment d'inertie du système mobile est suffisant pour que, pendant la durée τ, supposée très courte, du passage du courant à totaliser, le cadre ne se déplace pas d'une manière sensible, α est nul à la fin du temps τ, de sorte qu'en intégrant l'équation entre o et τ, après en avoir multiplié les termes par dt, il vient

$$I\frac{d\alpha}{dt}=\mathcal{H} s n\int_0^\tau i\,dt=\mathcal{H} s n q,$$

q désignant la quantité d'électricité envoyée à travers le cadre galvanométrique. Un grand moment d'inertie est d'ailleurs utile pour ralentir l'oscillation et amener un arrêt plus long à la fin de celle-ci.

Après le temps τ, le second membre de (1) s'annule et l'équation du mouvement se réduit à

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2}+\left(f+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{R}\right)\frac{d\alpha}{dt}+c\alpha=0.$$

Elle est de la forme suivante

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2}+2a\frac{d\alpha}{dt}+b^2\alpha=0,$$

si l'on pose, de manière à éviter les fractions et les radicaux,

$$a=\frac{f}{2I}+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2RI},$$

$$b=\sqrt{\frac{c}{I}}.$$

C'est une équation linéaire sans second membre, susceptible de donner des solutions de forme différente, suivant que $a>b$ ou $a<b$.

Dans le premier cas, la solution générale est

$$\alpha = e^{-at}\left(\mathrm{A}\, e^{t\sqrt{a^2-b^2}} + \mathrm{B}\, e^{-t\sqrt{a^2-b^2}}\right),$$

tandis que, dans le second cas,

$$\alpha = e^{-at}\left(\mathrm{A}\cos t\sqrt{b^2-a^2} + \mathrm{B}\sin t\sqrt{b^2-a^2}\right).$$

Les facteurs A et B sont, dans les deux cas, des constantes d'intégration.

La première solution montre que le galvanomètre revient à sa position d'équilibre sans osciller, fig. 86; on dit alors que le mouvement est *apériodique*. Dans la seconde hypothèse, l'équipage mobile effectue des oscillations d'amplitude décroissante avant de revenir au repos, fig. 87; le mouvement est dit *périodique*.

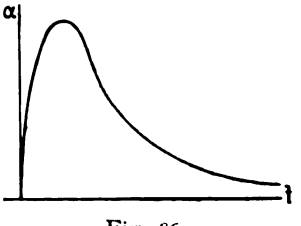


Fig. 86.

En posant

$$\sqrt{b^2-a^2} = \rho,$$

on peut écrire

$$\alpha = e^{-at}(\mathrm{A}\cos t\rho + \mathrm{B}\sin t\rho)$$

et

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at}\left\{(\mathrm{B}\rho - \mathrm{A}a)\cos t\rho - (a\mathrm{B} + \rho\mathrm{A})\sin t\rho\right\}.$$

Pour déterminer les constantes A et B, il suffit d'introduire dans les deux dernières équations les conditions initiales du mouvement, à savoir $t = 0$, $\alpha = 0$ et $d\alpha/dt = \mathcal{H}snq/\mathrm{I}$. On déduit de là

$$0 = \mathrm{A},$$

$$\frac{\mathcal{H}snq}{\mathrm{I}} = \mathrm{B}\rho.$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs, on trouve pour α et $d\alpha/dt$ les expressions

$$\alpha = e^{-at}\frac{\mathcal{H}snq}{I\rho}\sin t\rho,$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at}\left(\frac{\mathcal{H}snq}{I}\cos t\rho - \frac{a\mathcal{H}snq}{I\rho}\sin t\rho\right).$$

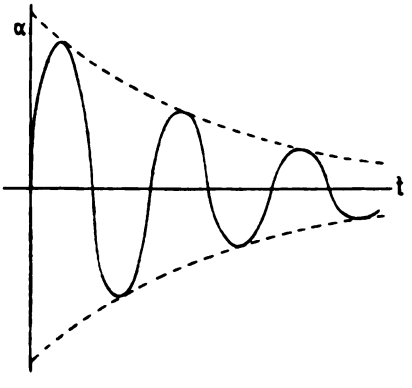


Fig. 87.

La vitesse angulaire $d\alpha/dt$ du système mobile s'annule au temps t pour lequel

$$\frac{\mathcal{H}snq}{I}\cos t\rho = \frac{a\mathcal{H}snq}{I\rho}\sin t\rho$$

ou

$$\operatorname{tang} t\rho = \frac{\rho}{a}$$

et

$$\sin t\rho = \frac{\rho}{\sqrt{a^2+\rho^2}}.$$

Par suite, la première élongation est donnée par la valeur de α correspondant à

$$t_1 = \frac{1}{\rho}\operatorname{arc\,tang}\frac{\rho}{a};$$

on trouve

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H}\, s\, n\, q}{I\rho} \frac{\rho}{\sqrt{a^2+\rho^2}}\, e^{-\frac{a}{\rho}\operatorname{arc\,tg}\frac{\rho}{a}}.$$

La vitesse angulaire s'annule encore lorsque

$$\operatorname{tang} t_2\rho = \operatorname{tang}(\pi + t_1\rho),$$

c'est-à-dire pour

$$t_2 = \frac{\pi}{\rho} + t_1$$

et, d'une manière générale, pour

$$t_m = \frac{\pi}{\rho} + t_{m-1}$$

ou

$$t_m = \frac{\pi}{\rho}(m-1) + t_1.$$

La m^e élongation a pour amplitude

$$\alpha_m = e^{-at_m} \frac{\mathcal{H}\, s\, n\, q}{I\rho} \sin\{\pi(m-1) + t_1\rho\}$$

$$= \alpha_1 e^{-a(m-1)\frac{\pi}{\rho}}.$$

Ces résultats montrent que le mouvement du cadre est isochrone, la durée d'une demi-oscillation étant $\pi/\rho = T$.

Pendant que le temps croît en progression arithmétique, l'amplitude des élongations décroît suivant les termes d'une progression géométrique dont la raison est e^{-aT}.

L'exposant $\lambda = aT$, pris positivement, s'appelle *décrément logarithmique* des oscillations, parce qu'il est le logarithme népérien du rapport des amplitudes de deux élongations successives :

$$\lambda = \log_e \frac{\alpha_{m-1}}{\alpha_m}.$$

On peut exprimer les coefficients a et b en fonction de λ et T, valeurs qui résultent directement de l'observation. On a, en effet,

$$a = \frac{\lambda}{T} = \frac{f}{2I} + \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2RI},$$

$$b = \frac{1}{T}\sqrt{\pi^2 + \lambda^2} = \sqrt{\frac{c}{I}},$$

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H} s n q}{I}\frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} e^{-\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

Dans le cas particulier où les couples amortisseurs sont nuls, $a = o$ et $\lambda = o$. La durée d'une demi-oscillation est alors

$$T_0 = \frac{\pi}{b},$$

d'où

$$T = T_0\sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}}.$$

Dans le cas où le mouvement est amorti, on peut écrire

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H} s n q}{I}\frac{T_0}{\pi} e^{-\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

On déduit de ce qui précède la mesure de la quantité d'électricité qui s'est écoulée dans la décharge instantanée :

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} s n}\frac{\pi}{T_0}\alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}. \qquad (2)$$

Si l'amortissement est pratiquement nul, ce qui arrive lorsque le galvanomètre est placé sans shunt dans le circuit d'un condensateur et que la résistance de l'air est très petite,

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} s n}\frac{\pi}{T_0}\alpha_1.$$

Dans beaucoup de cas le décrément logarithmique est négligeable devant π et l'équation (2) peut être simplifiée. Arc tang π/λ est alors très voisin de $\pi/2$ et on a sensiblement

$$e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}} = e^{\frac{\lambda}{2}}.$$

Comme, d'autre part,

$$e^{\frac{\lambda}{2}} = 1 + \frac{\lambda}{2} + \frac{1}{1.2}\frac{\lambda^2}{4} + \dots,$$

il vient, en supprimant λ^2 et les puissances supérieures de λ,

$$q = \frac{1}{\mathcal{H}_{sn}} \frac{\pi}{T_0} \alpha_1 \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right).$$

On trouve ce résultat directement si l'on considère que λ est la différence des logarithmes népériens de deux élongations successives,

$$\lambda = \log_e \alpha_{m-1} - \log_e \alpha_m,$$

et si l'on en infère qu'entre l'élongation sans amortissement α_0 et la première élongation observée α_1 doit exister la relation

$$\frac{\lambda}{2} = \log_e \alpha_0 - \log_e \alpha_1$$

ou

$$\frac{\alpha_0}{\alpha_1} = e^{\frac{\lambda}{2}} = 1 + \frac{\lambda}{2}.$$

L'amortissement des galvanomètres à aimant fixe augmentant rapidement à mesure que la résistance électrique diminue, il est utile de dresser une courbe montrant la variation de λ en fonction de la résistance R du circuit de la bobine. Cette courbe présente ordinairement une ordonnée infinie à l'origine et tend vers une asymptote correspondant à l'amortissement à circuit ouvert. Pour les valeurs de λ inférieures à 0,5, l'erreur faite en prenant $1 + \lambda/2$ au lieu du facteur exponentiel ne dépasse pas 0,2 pour 100.

Si l'amortissement est extrêmement faible, on peut admettre que les élongations décroissent suivant les termes d'une progression arithmétique, c'est-à-dire qu'entre les lectures consécutives α_1 et α_3, relevées du même côté du zéro, il y a quatre quarts d'oscillation dont les amplitudes successives diffèrent entr'elles d'intervalles angulaires égaux à $(\alpha_1 - \alpha_3)/4$. Il en

résulte que l'élongation première, corrigée de l'amortissement, est alors $\alpha_1 + (\alpha_1 - \alpha_3)/4$ et qu'on a

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} s n} \frac{\pi}{T_0} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4} \right).$$

Constante balistique. Son rapport avec la constante permanente. Coefficient de sensibilité d'un galvanomètre. — Dans l'expression générale (2), qui peut être mise sous la forme

$$q = \frac{1}{K} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}},$$

le facteur K représente l'élongation en radians pour l'unité C. G. S. électromagnétique de quantité d'électricité.

De même que pour la *constante permanente k* on prend ordinairement le nombre de divisions de l'échelle par micro-ampère, on définit habituellement la *constante balistique* K par l'élongation corrigée en divisions de l'échelle correspondant au micro-coulomb.

On a vu plus haut que

$$k = \frac{\alpha}{i} = \frac{\mathcal{H} s n}{c} = \frac{\mathcal{H} s n}{I} \frac{T_0^2}{\pi^2}.$$

Cette relation permet d'éliminer de l'équation (2) le facteur $I/\mathcal{H} s n$, généralement inconnu. Il vient

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{i}{\alpha} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}} = \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} \frac{1}{k} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}}.$$

On trouve ainsi, entre la constante balistique et la constante permanente d'un même galvanomètre, la relation curieuse

$$\frac{K}{k} = \frac{\pi}{T_0} = \frac{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}}{T},$$

qui permet de déduire la constante balistique de la constante permanente, de la durée d'une demi-oscillation et du décrément logarithmique.

On déduit de là une formule simple pour calculer la quantité d'électricité qui donne une élongation α_1. En effet, si dans l'équation

$$q = \frac{1}{K}\alpha_1\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) = \frac{T_0}{\pi k}\alpha_1\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right),$$

qui convient à un galvanomètre peu amorti, on remplace k par le rapport de la déviation α au courant $i = v/r$ qui la produit, on obtient

$$q = \frac{T_0}{\pi}\frac{v}{r\alpha}\alpha_1\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right).$$

Il ne faut pas perdre de vue que la formule d'amortissement approchée suppose λ faible en comparaison de π, ce qui n'est pas le cas pour tous les galvanomètres balistiques.

Pour estimer la durée d'une demi-oscillation, on lance dans le galvanomètre la décharge d'un condensateur et l'on fait partir un compte-secondes lors du premier passage de la bobine par l'une des positions extrêmes; on compte le nombre de demi-oscillations ou le nombre d'oscillations complètes et l'on arrête le compte-secondes après 10, 20, 30 oscillations, suivant la rapidité de celles-ci.

On obtient le décrément logarithmique en notant les lectures correspondant à des séries de 10, 20, 30 demi-oscillations. Le décrément cherché est le logarithme népérien du rapport des élongations extrêmes, divisé par le nombre de demi-oscillations observées :

$$\lambda = \frac{1}{m-1}\log_e\frac{\alpha_1}{\alpha_m}.$$

De T et λ on déduit la demi-période d'oscillation T_0 sans amortissement.

Si l'on désire déterminer le moment d'inertie du système mobile, on peut adjoindre à l'équipage une masse, telle qu'un balancier portant deux contrepoids, dont le moment d'inertie I' est calculable. En faisant osciller le cadre seul, on avait

$$T_0 = \pi\sqrt{\frac{I}{c}};$$

avec la masse supplémentaire, il vient

$$T_0' = \pi \sqrt{\frac{I + I'}{c}};$$

d'où

$$I = \frac{T_0^2}{T_0'^2 - T_0^2} I'.$$

Il est à remarquer que de légères erreurs sur T_0 et T_0' peuvent entraîner une erreur très importante sur I. Il est donc préférable, dans les mesures absolues, d'exprimer la quantité d'électricité en fonction de la constante balistique ou permanente, comme on l'a vu ci-dessus.

En général, on évalue la constante balistique en envoyant dans le galvanomètre la décharge d'un condensateur de capacité C connue, chargé à l'aide d'une pile étalon de force électromotrice E. Comme l'amortissement est faible à circuit ouvert, on applique la formule

$$CE = \frac{\alpha_1}{K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right).$$

On peut aussi utiliser la quantité d'électricité induite dans une bobine entourant le milieu d'un long solénoïde dont on interrompt le courant. En désignant par n_1 le nombre de spires du solénoïde par unité de longueur, par σ l'aire d'une spire, par i l'intensité du courant inducteur et par n le nombre de tours de fil de la bobine reliée au galvanomètre, dont le circuit, avec ses connexions, a une résistance R,

$$q = \frac{4\pi n_1 i \sigma n}{R} = \frac{\alpha_1}{K} e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}}$$

ou, si R est assez grand pour que l'amortissement soit faible,

$$\frac{4\pi n_1 i \sigma n}{R} = \frac{\alpha_1}{K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right).$$

On verra dans les mesures magnétiques que, lorsqu'on doit évaluer les extra-courants par un galvanomètre balistique, on se sert d'un circuit contenant une bobine d'induction pour

l'étalonnage de l'appareil, de manière que l'amortissement soit le même dans les deux séries d'expériences. Ce dispositif élimine le facteur de correction pour l'amortissement, puisqu'on a alors, entre les quantités d'électricité q et q' en jeu dans deux essais et les élongations α_1 et α_1' correspondantes, la proportion

$$\frac{q}{q'} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1'}.$$

D'une façon générale, pour éviter toute erreur, il faut étalonner les galvanomètres balistiques dans les conditions de circuit où ils sont employés.

Le plus souvent on compare les galvanomètres entr'eux d'après les constantes permanentes ou les constantes balistiques et sans s'occuper de la rapidité des lectures, qui est cependant un élément important au point de vue de l'usage de ces appareils et qui dépend des périodes d'oscillation. Pour en tenir compte, M. Armagnat propose d'appeler *coefficient de sensibilité* d'un galvanomètre à miroir l'indication correspondant à un courant de 1 micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale à 1000 divisions et la durée d'oscillation du système mobile étant de 1 seconde sans amortissement. On ramène aisément la constante permanente à une période donnée en remarquant qu'elle est proportionnelle à

$$\frac{\mathcal{H}\, s\, n}{I}\,\frac{T_0^2}{\pi^2}.$$

Résistance critique. — Si l'on fait osciller un galvanomètre Deprez et d'Arsonval pourvu d'un shunt, le mouvement reste périodique tant que la résistance du shunt est suffisante pour empêcher les courants induits de déterminer un amortissement trop considérable. Lorsque le shunt décroît, le décrément logarithmique augmente. Il arrive un moment où la seconde élongation est nulle. Ce cas répond à la condition $a = b$, soit en désignant par R_c la valeur correspondante de R,

$$\frac{f}{2I} + \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2 R_c I} = \sqrt{\frac{c}{I}}.$$

L'amortissement dû à l'air peut alors être négligé devant celui dû au couple électromagnétique. On a donc très sensiblement, pour la résistance critique du circuit galvanométrique, amenant la cessation des oscillations périodiques de l'équipage,

$$R_c = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2 I} \sqrt{\frac{I}{c}} = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2 I} \frac{T_0}{\pi}.$$

Quand on veut obtenir des indications rapides sans oscillations, on cherche à se rapprocher de l'amortissement critique. Lorsque celui-ci est obtenu $\lambda = \infty$ et la formule (2) se simplifie. En effet, l'expression

$$\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{\pi}{\lambda} - \frac{1}{3} \frac{\pi^3}{\lambda^3} + \frac{1}{5} \frac{\pi^5}{\lambda^5} - \cdots \right)$$

se réduit alors à 1, de sorte que

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} s n} \frac{\pi}{T_0} \alpha_1 e.$$

Pour trouver le temps T_c que le cadre met à atteindre sa position extrême dans le cas de l'amortissement critique, il suffit de faire

$$\rho = \sqrt{b^2 - a^2} = 0$$

dans l'équation

$$t_1 = \frac{1}{\rho} \operatorname{arc\,tg} \frac{\rho}{a}$$

développée comme ci-dessus. Il vient ainsi

$$T_c = \frac{1}{a} = \frac{1}{b} = \frac{T_0}{\pi}.$$

Cette relation permet de vérifier indirectement si l'on a bien l'amortissement critique.

La résistance critique peut être déterminée expérimentalement en faisant dévier le cadre shunté par une résistance et en diminuant celle-ci jusqu'à ce que le retour au zéro ait lieu sans oscillations.

Influence de la durée de la décharge. — La théorie qui pré-

cède suppose que la décharge traversant le galvanomètre a une durée négligeable devant la période d'oscillation de l'instrument. S'il n'en est pas ainsi, l'élongation commence avant la fin de la décharge et diffère de la valeur trouvée précédemment d'une quantité variable avec le rapport T_0/τ. C'est le cas lorsqu'on fait passer dans l'instrument l'extra-courant de rupture d'un électro-aimant dont la constante de temps est élevée.

Les différences peuvent être évaluées expérimentalement en déchargeant un condensateur de capacité C dans un galvanomètre dont on connaît la demi-période T_0 et en modifiant la résistance R du circuit de manière à obtenir des durées de décharge calculables par la formule

$$\tau = C\,R \log_e \frac{1}{n},$$

où n désigne la fraction de la charge primitive qui reste après le temps τ. (1) En estimant cette fraction à 1/100 et en négligeant la charge résiduelle, on a trouvé, avec un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, une différence de 15 pour 100 quand τ valait T_0, de 5 pour 100 lorsque τ valait $T_0/2$ et de 1 pour 100 quand τ valait $T_0/5$ avec un amortissement faible ; lorsqu'on réalisait l'amortissement critique, l'écart de 1 pour 100 n'était obtenu que pour une durée τ voisine de $T_0/83$.

Si l'on doit mesurer la quantité d'électricité due à l'extra-courant d'un électro-aimant dont la période variable dure plusieurs secondes, il est nécessaire d'employer un galvanomètre balistique à oscillations lentes. On construit, dans ce but, des cadres mobiles en forme de rectangle élargi dans le sens perpendiculaire au fil de suspension. On peut aussi fixer à un équipage ordinaire une sorte de balancier terminé par deux masses qui accroissent le moment d'inertie. Les appareils Carpentier à cadre élargi ont une demi-période d'oscillation comprise entre 5 et 15 secondes. Quand on se trouve en

(1) Éric Gerard ; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. IX. — Gauthier-Villars, Paris.

présence de grands électro-aimants à circuit magnétique fermé, le résultat est toujours douteux.

Il est très utile de prévoir un dispositif d'arrêt de la bobine des galvanomètres balistiques, dont les oscillations à circuit ouvert persistent parfois longtemps. A cette fin, on peut dériver entre les bornes une résistance en graphite ou en platine, p. 123, pourvue d'une clef. On ferme celle-ci au moment où le cadre passe par la position d'équilibre.

Répétition de la décharge pour obtenir une élongation renforcée. — Il est possible, en répétant périodiquement la décharge au moment où le cadre mobile repasse par la position d'équilibre, d'obtenir une élongation renforcée dont on peut déduire la quantité d'électricité correspondant à une décharge.

Supposons que ω soit la vitesse angulaire initiale communiquée au cadre par la première décharge. Au moment où l'équipage repasse par sa position de repos, après avoir accompli une oscillation complète, la vitesse angulaire est affaiblie. Elle peut être représentée par $m\omega$, m étant un coefficient inférieur à l'unité et d'autant plus petit que l'amortissement est plus grand. Si, à l'instant considéré, on lance dans le cadre une nouvelle décharge, la vitesse angulaire devient $\omega + m\omega = \omega(1 + m)$. En renouvelant encore une fois cette opération, on obtient $\omega(1 + m + m^2)$. Si l'on continue de même, la vitesse angulaire tend vers une limite

$$\omega(1 + m + m^2 + \dots) = \frac{\omega}{1 - m}$$

et l'amplitude des élongations croît, en l'absence de tout amortissement, vers une valeur α' telle que

$$\frac{1}{2} I \left(\frac{\omega}{1 - m}\right)^2 = \int_0^{\alpha'} c\alpha \, d\alpha = \frac{1}{2} c\alpha'^2.$$

Si $m = 0{,}9$, l'élongation extrême est décuple de la première.

Caractéristiques d'un galvanomètre. — On conclut des considérations précédentes que les données principales carac-

térisant un galvanomètre à aimant fixe sont : la résistance intérieure g, la résistance critique R_c, la durée T d'une demi-oscillation à circuit ouvert, peu différente de T_0, la courbe du décrément logarithmique λ en fonction de la résistance R du circuit galvanométrique, la constante permanente et la constante balistique K.

Il faut avoir soin de vérifier si le galvanomètre revient bien au zéro, car il est possible d'arriver à une sensibilité considérable en mettant l'équipage mobile dans une sorte d'équilibre indifférent par un défaut d'élasticité de la suspension.

Si le galvanomètre n'est pas proportionnel, il convient de tracer la courbe des déviations en fonction des courants.

Voici, à titre d'exemple, les résultats de l'étude complète d'un galvanomètre construit par un élève de l'Institut Montefiore, avec indication des erreurs relatives limites qu'ils comportent.

Proportionnalité des déviations aux courants

Micro-ampères	Divisions
0,968	27,1
1,935	54,0
3,22	90,1
4,57	127,0
5,67	157,5

Constante permanente k

27,9 divisions par micro-ampère,
30,25 mm à 1 m par micro-ampère,
151 100 radians par unité C. G. S
dk/k 0,0058.

Constante balistique K

35,6 divisions par micro-coulomb,
38,6 mm à 1 m par micro-coulomb,
193 000 radians par unité C. G. S.
$dK/K = 0,0077$.

ISTANCE R GALVANOMÉTRIQUE ohms	∞	11000	2000	500
ge $\frac{\alpha_1}{\alpha_m}$	0,0105	0,130	0,679	5,72
. . . . .	0,012	0,012	0,016	0,24
on directe) . . secondes	2,466	2,475	2,54	3,8
. . . . .	0,0025	0,0051	0,025	0,066
$+ \lambda^2/\sqrt{\pi^2 + \lambda^2_\infty}$ secondes	—	2,468	2,523	5,1
. . . . .	—	0,0025	0,0032	0,42
$/\sqrt{\pi^2 + \lambda^2_\infty} = 2{,}466$ secondes				
$KT_0 / k = 3{,}146 \pm 0{,}036$				
. . . . .	0,00425	0,0528	0,272	1,11
. . . . .	0,013	0,014	0,017	0,3
$^2_\infty / T_\infty = 1{,}274$				
5				
$\sqrt{IR\left(a - \frac{f}{2I}\right)}$				
$\frac{1 - a_\infty)}{^2 k}$ . . . C. G. S.	—	$4{,}35.10^6$	$4{,}36.10^6$	$4{,}51.10^6$
. . . . .	—	0,027	0,028	0,32
$= 28{,}84$ C. G. S.				
$\frac{s^2 n^2}{R} = \frac{2R(a - a_\infty)}{b^2 K^2}$ C. G. S.	—	17,69	17,71	18,31
. . . . .	—	0,036	0,038	0,33
$T_0'^2 - T_0^2) = 16{,}7$ C. G. S.				
3				
0,151 C. G. S.				

Résistance R du circuit galvanométrique	ohms	∞	11000	2000	500
$R_c = -\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2I\left(\sqrt{\frac{c}{I}} - \frac{f}{2I}\right)}$					
$= \frac{R(a - a_\infty)}{b - a_\infty}$	ohms	—	421	422	436
dR_c / R_c		—	0,019	0,02	0,31
R_c (observation directe) = 456 ohms					
$e^{\frac{\lambda}{\pi} \text{arc tg} \frac{\pi}{\lambda}}$		1,00526	1,0655	1,344	2,49
$1 + \frac{\lambda}{2}$		1,00525	1,0652	1,339	3,86
$1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4\alpha_1}$		1,0058	1,058	1,19	1,25
Vérification : $q K / \alpha_1$		1,006	1,061	1,34	2,42

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Galvanomètres des tangentes. — L'intensité du champ magnétique au centre d'un cadre circulaire pourvu de n spires de fil conducteur, rapprochées comparativement à la longueur r du rayon d'enroulement, est

$$\frac{2\pi n i}{r}$$

lorsqu'un courant d'intensité i parcourt la bobine. Si l'on oriente le cadre dans le méridien magnétique et si l'on suspend au centre une aiguille aimantée de très petites dimensions, dont le moment magnétique est $\mathfrak{A}$, l'aiguille dévie d'un angle α déterminé par l'égalité des couples dus au champ terrestre d'intensité horizontale $\mathfrak{H}$ et à l'action du courant :

$$\frac{2\pi n i}{r}\mathfrak{A}\cos\alpha = \mathfrak{H}\mathfrak{A}\sin\alpha.$$

Par suite,

$$i = \frac{\mathfrak{H} r}{2\pi n}\operatorname{tang}\alpha.$$

Quand les facteurs du second membre sont exprimés en

unités C. G. S., l'intensité du courant est donnée en ampères par la formule

$$i = \frac{5\,\mathcal{H}\,r}{\pi\,n}\,\text{tang}\,\alpha.$$

L'intensité horizontale du champ magnétique terrestre est fournie par une mesure indépendante.

Il faut installer le galvanomètre dans un local dépourvu d'aimants et de courants électriques, qui pourraient modifier les constantes magnétiques, et veiller à ce que, dans la construc-

Fig. 88.

tion de l'instrument lui-même, il n'entre pas de corps magnétiques. Les champs parasites limitent beaucoup l'emploi du galvanomètre des tangentes pour les mesures industrielles.

Dans les essais précis, des facteurs de correction doivent intervenir pour tenir compte de l'écartement des spires et de la longueur de l'aiguille. En désignant par r le rayon moyen des n spires, par $2\,l$ la longueur de la bobine, par $2\,l'$ la profondeur

radiale de celle-ci et par 2λ la longueur vraie de l'aimant, on a

$$i = \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n} \operatorname{tang} \alpha \left(1 + \frac{1}{2}\frac{l^2}{r^2} - \frac{1}{3}\frac{l'^2}{r^2} - \frac{3}{4}\frac{\lambda^2}{r^2}\right)\left(1 + \frac{15}{4}\frac{\lambda^2}{r^2}\sin^2\alpha\right).$$

La correction due à l'écartement des spires est la moins

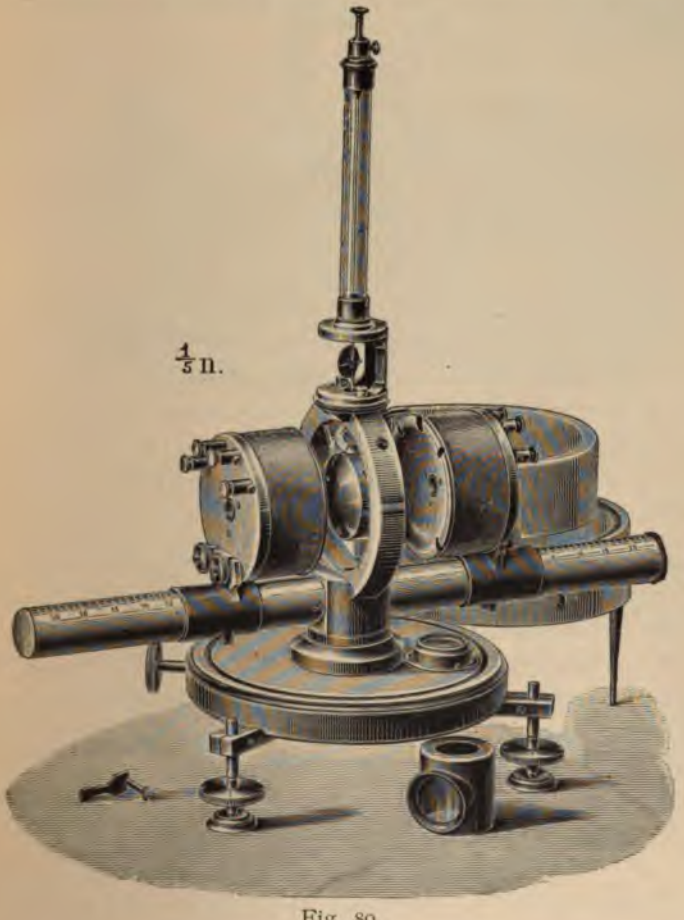


Fig. 89.

importante. Elle peut être éliminée si l'on adopte une bobine de section rectangulaire présentant une longueur suivant l'axe égale à l'épaisseur de l'enroulement multipliée par 0,8. Lorsque

la longueur est égale à l'épaisseur et que ces deux dimensions mesurent le dixième du rayon, l'erreur n'atteint pas 0,05 pour 100.

La correction nécessitée par la longueur de l'aiguille ne dépasse pas 0,5 pour 100, si cette longueur est inférieure au vingtième du rayon. L'erreur est négligeable pour une déviation de 26° environ.

On a vu plus haut qu'avec le galvanomètre des tangentes l'erreur relative causée par une incorrection de lecture est minima quand la déviation est voisine de 45°. Lorsqu'on fait des observations directes, on règle les expériences de manière à obtenir des déviations comprises entre 20° et 70°. Les intensités limites des courants mesurés sont alors dans le rapport de 1 à 7,5

L'emploi du galvanomètre des tangentes tend à se restreindre de plus en plus, par suite du peu de sensibilité de cet appareil et de la difficulté d'éviter les erreurs provenant des changements de la composante horizontale du champ terrestre occasionnés par les masses magnétiques mobiles, les courants de tramways électriques, les calorifères présentant du fer à température variable, etc.

Système Wiedemann. — Dans le galvanomètre de Wiedemann, fig. 89, l'aiguille aimantée est suspendue, par un long fil de cocon attaché à une tête de torsion, entre deux bobines mobiles sur des glissières orientées normalement à la direction du méridien. On peut ainsi faire varier la sensibilité de l'appareil. En appelant d la distance moyenne des centres des spires à l'aiguille, on a la formule

$$i = \mathcal{H} \frac{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi n r^2} \operatorname{tang} \alpha.$$

Des enroulements de rechange permettent la mesure de courants d'intensités très différentes. Les lectures s'effectuent par la méthode de réflexion.

Système Kelvin. — Le galvanomètre industriel de Lord Kelvin, fig. 90, repose sur le même principe. L'aiguille est

supportée par un pivot dans une boîte qui peut être déplacée suivant l'axe de la bobine B. Les observations se font directement à l'aide d'un index en aluminium *mn* mobile au-dessus d'un miroir destiné à éviter l'erreur de parallaxe. Le cadran est

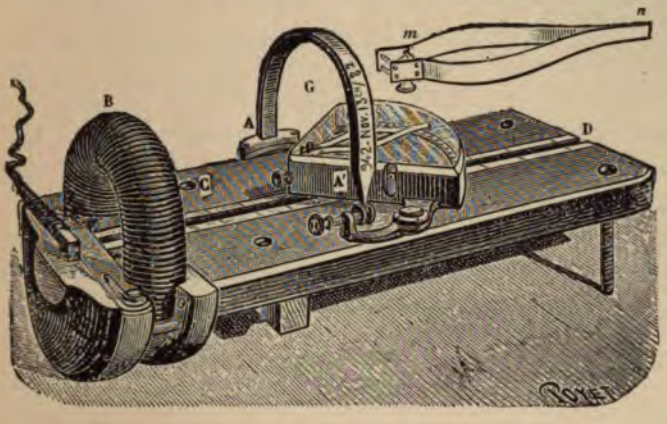


Fig. 90.

gradué de manière à indiquer la valeur de la tangente de l'angle de déviation. Il suffit de multiplier la lecture par une constante pour obtenir l'intensité du courant. Un aimant A peut être employé pour accroître le champ directeur et diminuer l'influence des champs parasites.

Système Obach. — Un autre artifice permettant de mesurer des courants d'intensités très différentes a été suggéré par M. Obach. Le cadre est mobile autour d'un axe horizontal. En changeant son inclinaison, on peut affaiblir l'action déviante du courant sur l'aiguille. En appelant β l'inclinaison du cadre sur la verticale, on a, pour l'égalité des couples,

$$\frac{2\pi n i}{r} \cos\beta\, \mathcal{A} \cos\alpha = \mathcal{H}\, \mathcal{A} \sin\alpha ;$$

d'où

$$i = \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n} \frac{\operatorname{tang}\alpha}{\cos\beta}.$$

Correction pour la torsion du fil de suspension. — Dans les galvanomètres des tangentes destinés aux expériences de haute précision dans lesquelles on mesure des courants faibles, les lectures se font par réflexion et l'aimant est suspendu par un fil de cocon ou de quartz. Dans ce cas il y a lieu de tenir compte du couple de torsion dû à la suspension.

Pour permettre la détermination de ce couple, le fil est porté par une tête de torsion, c'est-à-dire par un treuil qui peut tourner autour d'un axe vertical. On suspend d'abord l'aimant sans torsion. Pour cela, on commence par y substituer un barreau de métal non magnétique, qu'on oriente dans le plan du méridien à l'aide de la tête de torsion. On remplace ensuite le barreau neutre par l'aimant et l'on tourne le treuil d'un angle δ lu sur le cercle gradué de la tête de torsion. A cause de la raideur du fil, l'aimant dévie d'un angle δ' de même sens, de sorte que la torsion du fil se réduit à $\delta - \delta'$. Le couple de torsion est

$$c\,(\delta - \delta') = \mathcal{H}\,\mathfrak{A}\,\sin\delta'$$

ou simplement $\mathcal{H}\,\mathfrak{A}\,\delta'$ pour un angle δ' faible.

L'effet de la torsion peut donc être considéré sensiblement comme un accroissement de la composante horizontale $\mathcal{H}$ dans la proportion

$$1 \text{ à } 1 + \frac{\delta'}{\delta - \delta'} = (1 + \theta).$$

Par suite,

$$i = \frac{\mathcal{H}\,(1 + \theta)\,r}{2\,\pi\,n}\,\text{tang}\,\alpha.$$

Le rapport θ est appelé rapport de torsion.

Mesure d'une décharge instantanée à l'aide du galvanomètre à aimant mobile. — Supposons qu'une quantité d'électricité q traverse le multiplicateur d'un galvanomètre à aimant mobile, avec une rapidité telle que l'aiguille ne se déplace pas d'un angle appréciable pendant la décharge. On choisira pour cela un galvanomètre dont l'aimant présente un moment d'inertie suffisant.

En raisonnant comme on l'a fait au sujet des galvanomètres à bobine mobile, on arrive à l'expression

$$q = \frac{T_0}{\pi}\frac{\mathcal{H}\, r}{2\pi n}\alpha_1\, e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

Quand l'amortissement est faible, on peut adopter l'une des formules suivantes, plus simples,

$$q = \frac{T_0}{\pi}\frac{\mathcal{H}\, r}{2\pi n}\alpha_1\left(1+\frac{\lambda}{2}\right) \text{ ou } q = \frac{T_0}{\pi}\frac{\mathcal{H}\, r}{2\pi n}\left(\alpha_1+\frac{\alpha_1-\alpha_3}{4}\right).$$

Si l'élongation était trop grande, on pourrait employer un shunt, mais il faudrait avoir soin de calculer le décrément logarithmique avec ce dernier, parce que l'amortissement dû aux courants induits par l'aimant dans la bobine dépend de sa résistance.

Les galvanomètres à aiguille lourde peu amortis oscillent longtemps avant de revenir au zéro. Pour les arrêter, on envoie dans la bobine le courant d'une pile au moment où l'aimant repasse par le zéro. En réglant convenablement le sens et l'intensité du courant, on peut arrêter à peu près brusquement l'aiguille.

Moyens employés pour développer la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile. — *Forme à donner à la bobine.* Le galvanomètre des tangentes est peu sensible par suite de l'écartement qui sépare le multiplicateur et l'aimant. Aussi n'est-il guère utilisé dans les essais de précision que pour la mesure absolue des courants. Pour accroître sa sensibilité, il faut diminuer la distance des spires à l'aiguille. Dans ce cas, la relation qui unit l'intensité du courant à la déviation est fort complexe et, en général, indéterminée.

Si l'on développe la fonction inconnue $i = f(\alpha)$ suivant la série de Mac-Laurin, il vient

$$i = f(o) + \frac{\alpha}{1}f'(o) + \frac{\alpha^2}{1.2}f''(o) + \dots$$

La fonction doit s'annuler avec α, de sorte que $f(o) = o$. De

plus, si la déviation est très faible, on est autorisé à négliger le troisième terme, ainsi que les suivants, et à admettre que l'intensité est proportionnelle à la déviation :

$$i = A\,\alpha.$$

Le coefficient A, qui constitue le facteur de réduction du galvanomètre, se détermine en envoyant dans ce dernier un courant d'intensité connue.

Afin de déterminer la forme la plus avantageuse à donner à la bobine en vue d'économiser le fil et de diminuer la résistance électrique, reprenons l'expression de l'intensité du champ magnétique dû à un courant circulaire de rayon R en un point de l'axe situé à une distance r du centre :

$$\mathcal{H} = 2\pi i - \frac{R^2}{(r^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Si l'on pose $\mathcal{H}$ = constante et si l'on considère R et r comme variables, on a l'équation d'une courbe présentant deux parties symétriques, fig. 91. L'aire limitée par cette courbe est la section méridienne d'un volume de révolution suivant lequel on peut enrouler le fil. Toutes les spires remplissant ce volume ont sur l'unité de pôle centrale une action au moins égale à $\mathcal{H}$. Les spires situées en dehors ont un effet moindre. La section hachurée dans la fig. 91, qui ménage une cavité

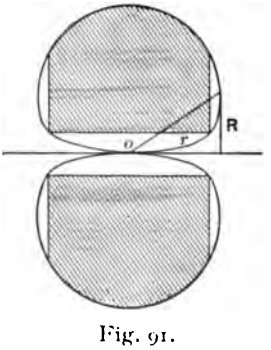


Fig. 91.

cylindrique pour loger l'aiguille, représente donc la fo-

rationnelle de la bobine d'un galvanomètre de grande sensibilité. Lord Kelvin s'est rapproché le plus possible de cette forme dans la construction de ses appareils.

Dispositions d'aimants. Nous avons vu que la déviation accusée par un galvanomètre des tangentes est indépendante du moment magnétique de l'aiguille. On pourrait donc à la rigueur se contenter d'une aiguille en fer doux, qui s'aimanterait sous l'influence combinée du magnétisme terrestre et du courant. Mais ce système offrirait des inconvénients graves. Les forces agissantes étant faibles, les oscillations seraient très lentes et le rapport de torsion considérable. De plus, la position de l'axe magnétique varierait dans l'aiguille, de sorte que les déviations lues sur l'échelle ne représenteraient pas véritablement les angles de l'axe magnétique avec la position de repos.

Pour ces raisons, on emploie, dans les galvanomètres destinés à la mesure de courants faibles, des aiguilles aimantées aussi fortement que possible, dont le magnétisme ne varie pas sous l'action du courant.

On peut augmenter la déviation provoquée par l'action électromagnétique en diminuant l'action directrice de la terre sur l'équipage mobile. Il y a deux moyens d'arriver à ce but, fig. 92.

A la tige qui supporte l'aiguille et qui traverse le multiplicateur on peut fixer, à l'extérieur de celui-ci, une seconde aiguille, orientée en sens inverse de la première. En choisissant des aiguilles de moments magnétiques peu différents, on affaiblit autant qu'on veut le couple directeur dû à la terre. Un tel système d'aiguilles est dit *astatique.* Comme il est difficile d'orienter les deux axes magnétiques exactement dans un même plan, l'ensemble a presque toujours une résultante bissectrice, de façon que l'équipage mobile prend une position dans laquelle les aiguilles paraissent normales au méridien magnétique.

M. Weiss a établi un système astatique présentant un faible moment d'inertie, en employant deux aiguilles verticales identiques ayant leurs pôles de noms contraires accolés. On forme

ainsi un circuit magnétique qui s'oppose à la désaimantation des barreaux.

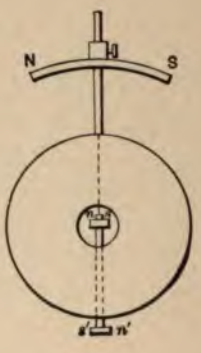


Fig. 92.

L'action terrestre peut également être modifiée par un aimant directeur N S, fixé au-dessus de l'aiguille. En changeant l'écartement et l'orientation de cet aimant, il est possible de diminuer ou d'augmenter à volonté l'effort directeur.

Le système astatique avec aimant directeur a l'avantage de rendre l'équipage mobile moins sensible aux influences magnétiques extérieures. Toutefois il est bon d'amener le système d'aiguilles à 90° de la position qu'il prend sous l'effet du champ terrestre seul ; sinon, une petite variation diurne de ce dernier peut changer le signe de la résultante de l'action de la terre et de celle antagoniste de l'aimant directeur, en provoquant un retournement de l'équipage mobile.

On substitue avec avantage à un aimant directeur de hauteur réglable deux aimants superposés dont on modifie, à l'aide d'un pignon d'engrenage, l'écart angulaire dans des plans horizontaux.

Dans les appareils très sensibles avec système astatique, chacune des aiguilles aimantées composant celui-ci est entourée d'un multiplicateur.

Lorsque les galvanomètres sont destinés à la mesure des courants très faibles traversant les corps peu conducteurs, on donne aux multiplicateurs un grand nombre de spires,

dont la résistance totale dépasse parfois 20000 ohms. Il faut alors isoler avec le plus grand soin toutes les parties du circuit électrique. Les bobines et les bornes sont portées par des supports ou des colonnettes en ébonite. Les appareils sont enfermés dans des cages dont l'atmosphère intérieure est desséchée par des moyens chimiques.

En utilisant les dispositifs ci-dessus, on obtient des galvanomètres donnant jusque 60 000 divisions par micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale à 1 000 divisions. A la valeur de la constante, il faut joindre celle de la période d'oscillation pour caractériser un tel instrument. Ces galvanomètres très sensibles sont surtout employés pour la détermination des résistances d'isolement et les mesures bolométriques.

Amortissement du mouvement du système mobile. — On recherche, pour les essais de précision, non seulement des galvanomètres très sensibles, mais des appareils permettant des lectures rapides. Dans ce but on amortit le mouvement

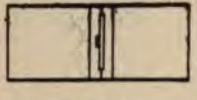


Fig. 93.

des aiguilles. Les moyens mis en œuvre sont d'ordre mécanique et d'ordre électrique.

Les aiguilles et leurs suspensions sont naturellement amorties par la résistance que l'air oppose à leur mouvement. On peut augmenter cette résistance en attachant à l'équipage mobile une palette se déplaçant dans un espace confiné, où il se produit des remous d'air qui arrêtent rapidement les oscillations.

Dans quelques galvanomètres de Lord Kelvin, l'aiguille aimantée est fixée au dos d'un petit miroir soutenu par un fil court, entre deux glaces très rapprochées, dans un cylindre de cuivre, fig. 93. Si l'espace entre le miroir et le cylindre est suffisamment faible, le système est apériodique (dead beat).

On a aussi recours à des flotteurs plongeant dans la glycérine, mais la viscosité du liquide ne permet pas de se servir de ce moyen pour les appareils dont les couples directeurs sont petits.

L'amortissement électrique est obtenu en profitant de l'action retardatrice des courants induits développés par le déplacement des aimants mobiles. Quand le circuit galvanométrique est fermé, il existe un amortissement dû aux courants

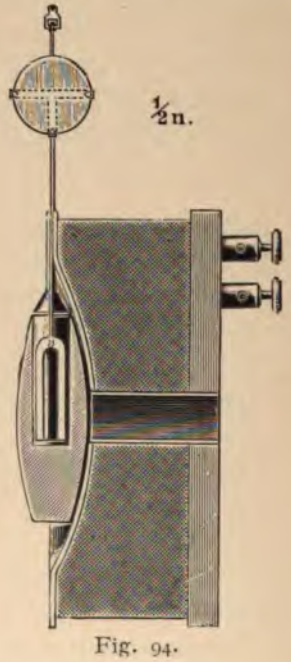


Fig. 94.

induits occasionnés dans le multiplicateur. M. Siemens a réalisé un amortissement plus efficace en donnant à l'aimant la forme d'une cloche fendue, forme qui a l'avantage de rapprocher les pôles et de mieux retenir le magnétisme, et en logeant la cloche dans une masse de cuivre où l'on a percé, à cet effet, une cavité cylindrique, fig. 94. Il se produit de la sorte des courants d'induction relativement intenses, qui provoquent un arrêt rapide des oscillations.

Galvanomètre de torsion Siemens et Halske. — Le galvanomètre suivant, fig. 95, très usité en Allemagne, permet des lectures directes entre des limites très étendues. L'aimant mobile A, en forme de cloche, est supporté par un fil de cocon dans un cadre multiplicateur CC. Il est dirigé par un ressort à boudin B pourvu, à la partie supérieure, d'une tête de torsion T. Les mouvements sont amortis par des ailettes en mica *mm* fixées à l'équipage mobile.

Lorsque l'aimant est dévié sous l'action du courant, on le ramène au zéro, que pointe un index, grâce à une torsion α lue sur un cercle gradué. On a la relation

$$i = \frac{\alpha}{k},$$

k étant une constante à déterminer par expérience.

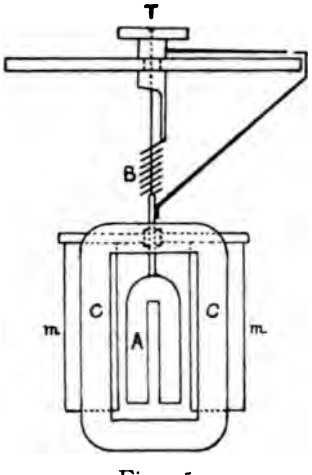
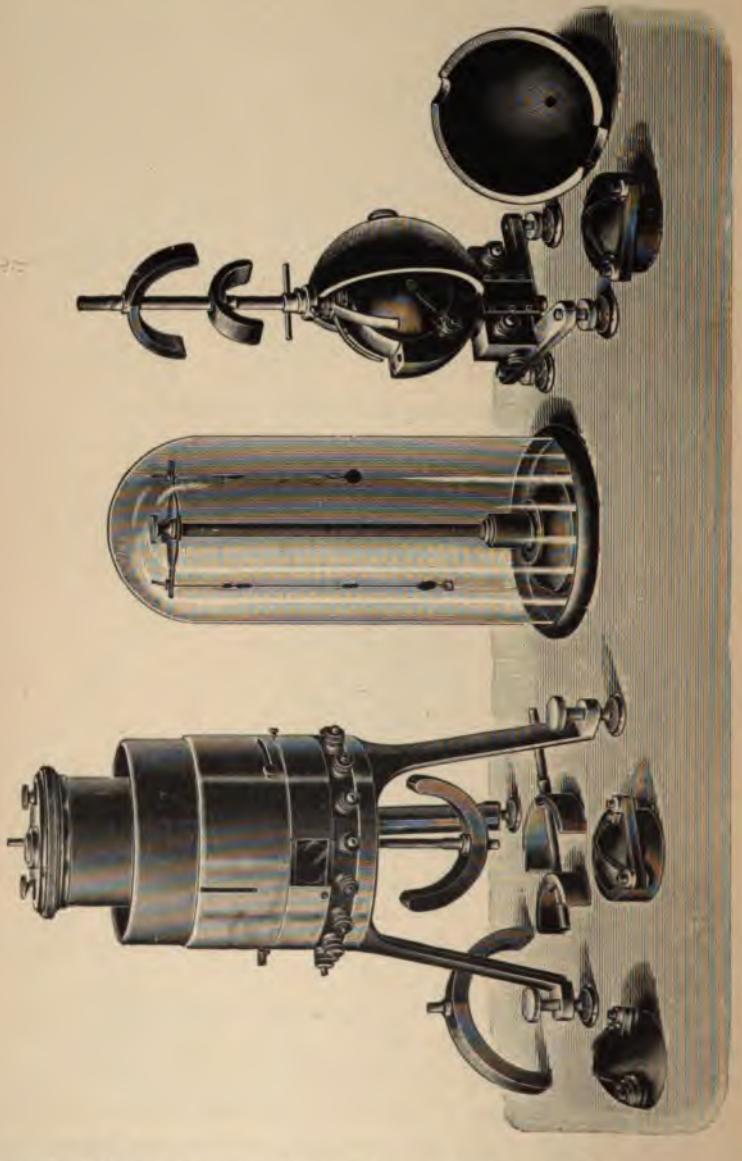


Fig. 95.

Il est à remarquer que, comme l'aimant est toujours ramené à la même position, le couple équilibré par la torsion ne dépend que de l'intensité du courant et du moment de l'aimant. Il est indépendant des champs extérieurs, à la condition que ceux-ci ne soient pas assez forts pour modifier le magnétisme de l'aimant mobile.

Le ressort directeur peut être tordu de 360°, sans que l



limite d'élasticité soit dépassée, ce qui permet la mesure d

courants très différents. On peut encore étendre les limites d'emploi de l'appareil en utilisant des shunts, combinés au besoin avec des résistances en série.

Galvanomètres cuirassés. — Lord Kelvin a fait usage d'écrans magnétiques en fonte autour des galvanomètres destinés à fonctionner sur les navires, dans le but d'éviter l'influence du champ terrestre ainsi que celle des masses de fer qui se trouvent à bord. L'équipage mobile est alors dirigé par un aimant enfermé dans la cuirasse.

Le voisinage de machines électriques, de distributions de courants intenses et, particulièrement, de tramways à fil de contact oblige à user de dispositifs analogues dans les laboratoires d'étalonnage, où les galvanomètres à aimant mobile sont utilisés pour la mesure de courants de très faible intensité.

Le galvanomètre de MM. Du Bois et Rubens, représenté à gauche de la fig. 96, comporte deux paires de bobines fixées contre un plateau vertical en ébonite. Dans une rainure du plateau passe un fil de quartz supportant les deux aimants d'un système astatique, le miroir et un disque mince servant d'amortisseur. Ce disque se meut entre deux autres disques dont on peut régler à volonté la distance. Il se produit ainsi des remous d'air amortisseurs. Pour supprimer les influences magnétiques extérieures, l'appareil et ses aimants directeurs sont enveloppés d'une double cuirasse cylindrique en fer forgé.

La droite de la fig. 96 montre un galvanomètre avec une paire de bobines, dont les cuirasses ont la forme de sphères coupées suivant un grand cercle. Les joints sont disposés à 90° et rodés de façon à assurer une grande perméance.

On voit, sous une cloche centrale, les équipages mobiles employés dans les deux appareils décrits.

Galvanomètre Broca. — Pour arriver à éviter les cuirasses, quand la distance des aimants perturbateurs est grande vis-à-vis les dimensions des aimants mobiles de l'instrument, M. Broca a imaginé de constituer ceux-ci à l'aide de deux aiguilles aimantées verticales, possédant chacune un point conséquent médian et orientées comme l'indique la fig. 97. Deux bobines

entourent respectivement la paire de pôles supérieure et la paire de pôles inférieure. On pourrait aussi faire agir une bobine unique sur la paire de pôles intermédiaire. Le miroir est en m. Un petit aimant directeur, mû par une vis micrométrique, se trouve sous l'équipage mobile.

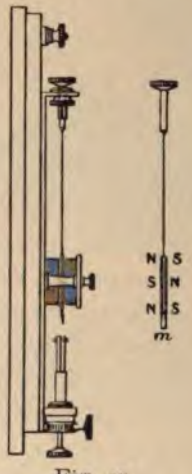


Fig. 97.

$\mathfrak{A}$, $2\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{A}$ étant les moments des trois paires de pôles disposées suivant trois lignes horizontales, dont celle du milieu est équidistante des deux extrêmes, si un courant ou un aimant perturbateur produit des champs $\mathcal{H}$, $\mathcal{H}'$ et $\mathcal{H}''$ aux endroits occupés par ces trois couples de pôles, son action résultante est proportionnelle à $\mathfrak{A}\,\mathcal{H} - 2\mathfrak{A}\,\mathcal{H}' + \mathfrak{A}\,\mathcal{H}''$. Elle s'annule quand $\mathcal{H}'$ est la moyenne de $\mathcal{H}$ et $\mathcal{H}''$, ce qui est le cas dans l'hypothèse admise.

En général, il est facile de transformer les appareils à bobines fixes suivant le système décrit, afin de les rendre peu sensibles aux effets magnétiques extérieurs.

Galvanomètre différentiel. Modèle de Lord Kelvin. Réglage et applications. — Les méthodes de mesure de l'intensité des courants électriques étudiées précédemment sont des méthodes absolues (cas du galvanomètre des tangentes) ou des méthodes par comparaisons successives (cas d'un galvano-

mètre gradué à l'aide d'un courant connu). Il existe aussi une méthode de réduction à zéro pour l'évaluation des courants, basée sur l'emploi du *galvanomètre différentiel*.

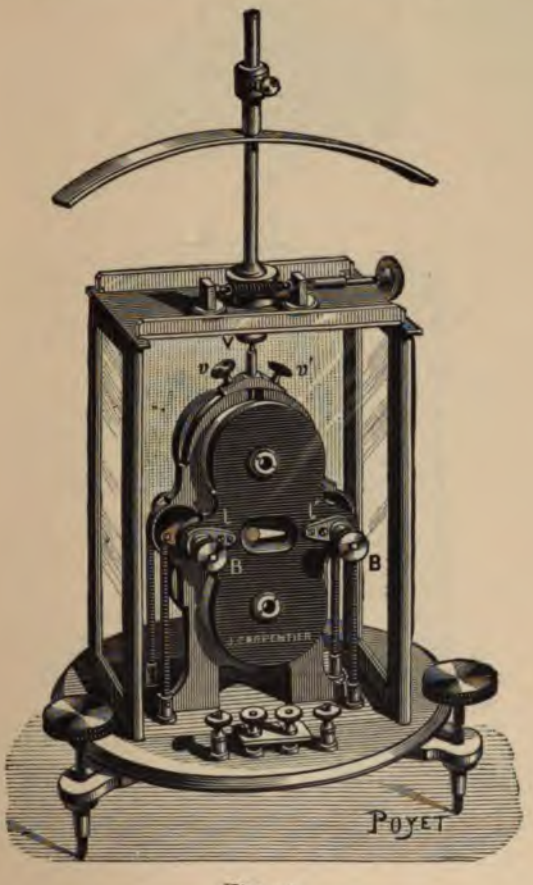


Fig. 98.

Cet appareil comporte deux multiplicateurs parcourus par les courants à comparer de telle manière que leurs actions électromagnétiques soient antagonistes. On bobine souvent les fils des deux enroulements ensemble, mais alors les défauts d'isolement, ainsi que les effets d'induction mutuelle et de capacité, sont à craindre.

Le modèle de Lord Kelvin, construit par M. Carpentier, fig. 98 et 99, possède un système astatique orienté par un aimant directeur. L'équipage mobile est suspendu à un fil de cocon ou

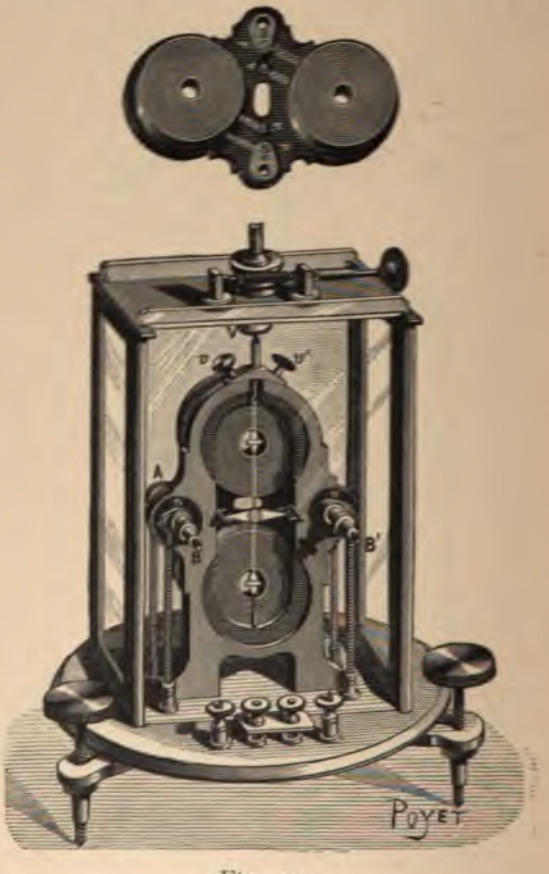


Fig. 99.

de quartz. Il comprend une tige en aluminium portant, à la partie supérieure et à la partie inférieure, un même nombre de fragments de ressort de montre fortement aimantés et dont les pôles sont orientés en sens inverses. Une palette en aluminium, pourvue d'un petit miroir concave, sert d'amortisseur à air. Deux paires de bobines indépendantes entourent les deux groupes d'aimants. Ces enroulements peuvent être facilement

enlevés pour découvrir l'équipage mobile. Les deux paires de bobines agissent en sens contraires sur les aimants correspon-

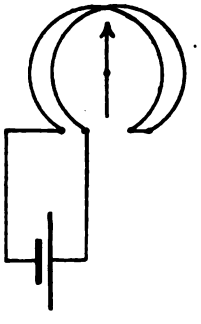


Fig. 100.

dants. Dans certains instruments, l'égalité des effets électromagnétiques des deux circuits est assurée par une petite bobine additionnelle, dont la position à proximité d'un des systèmes d'aimants peut être modifiée dans une glissière. L'appareil est

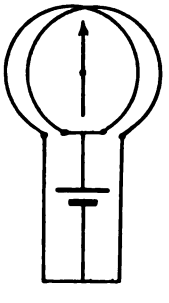


Fig. 101.

monté sur un socle en ébonite à vis calantes et est muni d'un niveau à bulle centrale et de quatre bornes, deux par circuit. Il est enfermé dans une cage en verre ou en métal.

On vérifie l'égalité des résistances électriques en mesurant celles-ci par une des méthodes connues et l'égalité des effets électromagnétiques en faisant passer dans les deux circuits groupés en série, fig. 100, le même courant, qui ne doit pas occasionner de déviation de l'équipage mobile.

On peut aussi contrôler l'égalité des résistances en dérivant les deux circuits par rapport aux pôles d'une même pile, fig. 101. On corrige la différence éventuelle en ajoutant une résistance passive à l'un des circuits.

Le galvanomètre différentiel convient pour comparer un courant inconnu avec un courant connu, fourni par une pile étalon dans une résistance déterminée. L'instrument est surtout appliqué à la mesure des résistances électriques.

On peut comparer des courants inégaux en intercalant un shunt entre les bornes de la bobine galvanométrique correspondant au courant le plus intense. Si m désigne le pouvoir multiplicateur du shunt, les deux courants qui assurent l'équilibre du système mobile sont dans le rapport m à 1.

A la rigueur, il n'est pas indispensable que les résistances et les actions électromagnétiques des deux circuits de l'appareil soient égales avec des courants égaux pour que celui-ci puisse être employé par la méthode différentielle. Soit un galvanomètre pourvu de deux multiplicateurs quelconques, dont les constantes sont respectivement k et k'. Si l'on fait passer dans les bobines des courants d'intensités i et i' telles que l'équipage mobile reste en équilibre, on a

$$ki = k'i',$$

d'où

$$\frac{i}{i'} = \frac{k'}{k} = \text{A}.$$

Connaissant A, on peut déterminer i en fonction de i'. Un des cadres peut, par exemple, être enroulé de fil fin et traversé par le courant connu d'une pile étalon, l'autre cadre étant formé de gros fil et parcouru par un courant intense.

Le galvanomètre différentiel peut amener une erreur systématique lorsque les deux circuits présentent des inégalités de température susceptibles de créer des couples thermo-électriques. C'est une raison qui réduit l'usage de cet appareil dans les mesures de haute précision.

Choix d'un galvanomètre. — Le choix d'un galvanomètre dépend essentiellement du genre d'essais qu'on veut effectuer.

Désire-t-on poursuivre des expériences de haute précision sur la mesure absolue des courants, on se servira d'un galvanomètre des tangentes, dont les lectures par réflexion se feront d'après la méthode subjective. Cet appareil sera placé dans un local construit et meublé avec la préoccupation d'éviter les corps magnétiques. Les conducteurs de connexion seront concentriques ou formés de fils cordés, afin d'éliminer les effets électromagnétiques des courants.

Les mesures relatives de précision s'effectuent de préférence avec des galvanomètres à aimant fixe, qui sont moins influencés que les galvanomètres à aimant mobile par les champs parasites. Pour les essais exigeant une très grande sensibilité, on choisit les galvanomètres astatiques du genre Kelvin, tandis que, pour les mesures balistiques, les galvanomètres à aiguille mobile lourde sont les plus convenables.

Nous avons résumé, dans le tableau suivant, les données principales de quelques types usuels de galvanomètres, la sensibilité ramenée à 1 ohm et à 1 seconde étant obtenue en divisant par la racine carrée de la résistance et par le carré de la durée d'oscillation la déviation, exprimée en divisions d'une échelle placée à une distance de 1000 divisions, qu'occasionne 1 micro-ampère.

GALVANOMÈTRES.	Résistance en ohms.	Durée d'oscillation en secondes.	Déviation par micro-ampère à 1000 divisions de l'échelle.	Courant en millièmes de micro-ampère par division à 1000 divisions de l'échelle.	Sensibilité ramenée à 1 ohm et 1 seconde.
Aimants fixes.					
Siemens et Halske (fig. 82 et 83).	15	5	40	25	0,41
Ayrton (fig. 81).	350	14	1 280	0,782	0,35
Modèle simple (fig. 76).	13,2	2,2	32,5	30,8	1,85
Suspension à boudins (fig. 77).	200	2	14	71,5	0,25
Suspension à boudins (fig. 78 et 79).	446,4	2	92	10,9	1,1
	25	4	28	35,7	0,35
	224	7	331	3,02	0,45
Aimants mobiles.					
Edelman (fig. 89).	600	18	1 000	1	0,125
Kelvin (fig. 98 et 99).	6 000	20	64 000	0,0156	2,07
Broca (fig. 97).	1 070	10	20 000	0,05	6,1

Chapitre VIII.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Principe. — Si l'on remplace l'aiguille aimantée d'un galvanomètre à cadre fixe par une bobine mobile, où le courant accède par l'intermédiaire d'une suspension bifilaire métallique, l'enroulement mobile tend à se placer parallèlement à l'enroulement fixe quand les deux parties du système sont parcourues par des courants. Un instrument basé sur ce principe porte le nom d'*électrodynamomètre*.

L'action électrodynamique, équilibrée par la torsion de la suspension, est proportionnelle au produit des intensités des courants qui traversent les deux bobines et, si le même courant parcourt celles-ci, au carré de l'intensité ; d'où la possibilité de se servir de tels appareils pour la mesure des courants alternatifs.

On peut aussi évaluer le couple électrodynamique en suspendant une bobine au-dessus d'une autre, disposée à plat, et en équilibrant, à l'aide d'une balance, l'attraction mutuelle des deux bobines. Les instruments de ce genre sont appelés *balances électrodynamiques*.

Les appareils considérés sont spécialement adaptés à la

mesure des courants alternatifs. Il faut donc avoir soin d'éliminer de leur construction toute pièce métallique massive susceptible de devenir le siège de courants de Foucault, qui faus-

Fig. 102.

seraient les indications. On sait que ces courants exercent une action répulsive sur les courants alternatifs qui leur donnent naissance. Les socles et couvercles seront isolants et les pièces de consolidation doivent être divisées autant que possible, si elles sont conductrices.

Électrodynamomètre de Weber. — La bobine mobile est portée par une suspension bifilaire et orientée normalement à la bobine fixe, fig. 102. Une tête de torsion permet de ramener la bobine mobile dans sa position de repos. Un miroir sert à la lecture des déviations. L'appareil est mis en station de manière que l'axe du cadre mobile soit dans le méridien magnétique.

A étant une fonction des éléments de construction et des distances relatives des bobines parcourues par un même courant i, le couple électrodynamique peut être représenté, pour une déviation θ, par $A\, i^2 \cos\theta$; il s'annule lorsque les bobines possédant le même centre de figure sont parallèles. Le couple antagoniste développé par la torsion du bifilaire est $c \sin\theta$. Enfin, le couple dû à la composante horizontale $\mathcal{H}$ du champ magnétique terrestre vaut $\pm B\, i\, \mathcal{H} \sin\theta$, suivant le sens du courant. On a donc l'équation d'équilibre

$$A\, i^2 \cos\theta = c \sin\theta \pm B\, i\, \mathcal{H} \sin\theta.$$

Si l'on ramène l'axe de la bobine mobile parallèlement au méridien en agissant sur la tête de torsion, le troisième couple disparaît et l'on a simplement, pour une torsion θ,

$$i = \sqrt{\frac{c}{A} \sin\theta}.$$

Quand l'angle θ est suffisamment faible, on peut alors écrire

$$i = \sqrt{\frac{c}{A}\theta}.$$

Si la bobine mobile était suspendue comme dans le galvanomètre Deprez et d'Arsonval, l'instrument serait plus sensible et la dernière relation serait rigoureusement applicable.

Dans le cas où l'on mesure des courants alternatifs, le magnétisme terrestre est sans influence sur le résultat, car il soumet le cadre à un couple oscillant dont l'effet est nul si la fréquence est suffisante.

Électrodynamomètres de Fleming et de Bellati. — Dans l'appareil de M. Fleming, fig. 103, un disque de cuivre D est

suspendu au centre d'une bobine C et orienté à 45° par rapport à cette bobine. Lorsqu'on fait passer dans celle-ci un courant ondulatoire, sa réaction sur les courants induits dans la plaque tend à amener cette dernière dans la position bb', pour laquelle le flux périodique qui la traverse est minimum. Le miroir M permet de lire, par réflexion, l'angle d'équilibre de la pièce mobile soumise, d'une part, aux forces électrodynamiques sensiblement proportionnelles, dans le cas de courants sinu-

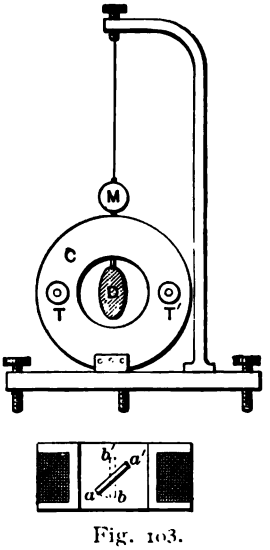


Fig. 103.

soïdaux, au carré des intensités efficaces à mesurer et, d'autre part, à la réaction de torsion du fil de suspension. Avec des courants non sinusoïdaux, la graduation dépend de la forme des ondes.

Quand on emploie un disque de fer au lieu d'un disque de cuivre, il se produit des phénomènes électrodynamiques et électromagnétiques complexes. M. Bellati a cherché à éliminer les premiers en se servant d'un faisceau de fils de fer disposé perpendiculairement au méridien magnétique et à 45° par rapport à la bobine, ce qui réduit au minimum l'effet du champ terrestre et transforme l'appareil en une sorte de galvanomètre à fer doux. Si la perméabilité du fer varie peu, le couple déviant

est pratiquement proportionnel au carré du courant efficac
Avec un tel instrument, beaucoup plus sensible que le préc
dent, il est possible de déceler des courants téléphoniques d
l'ordre du micro-ampère.

**Balances électrodynamiques de Lord Kelvin, de Pell
et de Kew.** — On doit à Lord Kelvin une série d'appareil
appelés ampèremètres-balances, dans lesquels un fléau porte
chacune de ses extrémités une bobine mobile disposée entr
deux bobines fixes. Les six bobines sont parcourues par
même courant de telle manière que l'une des bobines mobile

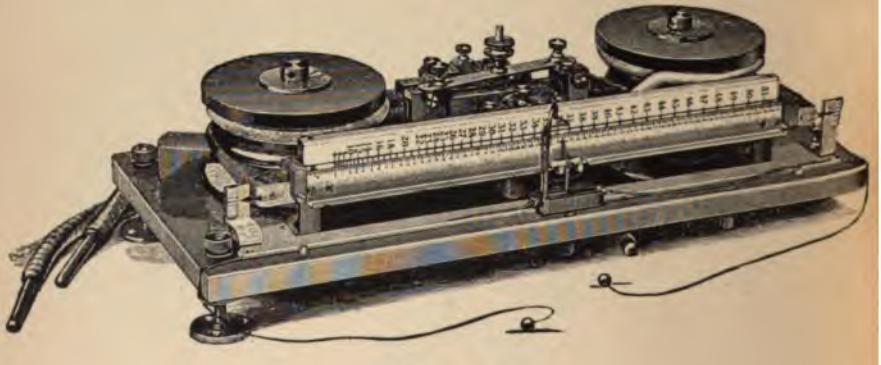


Fig. 104.

soit attirée vers le bas et l'autre vers le haut. Les effets du magnétisme terrestre sont compensés par le fait que les deux bobines mobiles sont traversées dans le même sens par le courant. Pour amener celui-ci aux bobines mobiles, Lord Kelvin a eu l'idée ingénieuse de suspendre le fléau par des faisceaux très flexibles, composés d'un grand nombre de fils fins en cuivre. Des poids glissant sur les bras du fléau permettent de ramener ce dernier dans la position horizontale et d'estimer l'intensité du courant traversant les bobines. Ces poids sont déplacés par l'intermédiaire d'un petit chariot qu'on fait mouvoir à l'aide de deux cordelettes de soie. Les index qui terminent le fléau servent à repérer sa position horizontale.

Comme un enroulement parcouru par des courants alter-

natifs est repoussé par les pièces métalliques voisines, les appareils destinés à la mesure des courants de ce genre sont montés sur un socle d'ardoise et leurs bobines sont enroulées sur des noyaux en ardoise ou en porcelaine.

La formule d'une telle balance est

$$I = \frac{1}{K}\sqrt{p},$$

p représentant le moment du couple dû à la pesanteur et I se rapportant à l'intensité efficace dans le cas des courants alternatifs.

Les balances de Lord Kelvin reçoivent une graduation empirique. Il existe une série d'appareils permettant d'évaluer de 1000 ampères à 0,001 ampère, l'échelle de chaque instrument étant graduée de 1 à 100. La précision des mesures peut monter à 0,1 pour 100. Ces balances sont très employées dans les laboratoires pour le tarage des ampèremètres et voltmètres à courants alternatifs. Dans les modèles convenant aux courants intenses, on est obligé de faire usage de conducteurs de forte section, qui doivent être subdivisés pour éviter l'effet Kelvin et admettre l'application des lois relatives aux conducteurs filiformes.

M. Pellat a imaginé une balance électrodynamique dans laquelle une longue bobine fixe, disposée horizontalement et produisant un champ magnétique sensiblement uniforme dans sa région médiane, agit sur une petite bobine pourvue, en son centre de figure, d'un couteau d'agate reposant sur un plan. Lorsqu'on envoie le courant de la bobine fixe dans la bobine mobile, à l'aide de spirales en argent, cette dernière tend à se renverser. On rétablit l'équilibre par des poids placés dans un plateau que porte un fléau équilibré fixé à la bobine mobile. La position d'équilibre est contrôlée au moyen d'un microscope. On élimine l'action du magnétisme terrestre en changeant le sens du courant dans les bobines ; la moyenne des poids utilisés dans les deux expériences est proportionnelle au carré de l'intensité. Le couple électrodynamique pouvant se déterminer par le calcul, l'instrument permet des mesures absolues. L'in-

fluence des extrémités de la bobine fixe exige une correction.

Un autre appareil plus portatif, construit sur le même principe, fig. 105, et muni d'une bobine fixe de faible longueur, a reçu le nom d'ampère-étalon. Étalonné à l'aide du précédent, il permet d'estimer les courants en appliquant la formule

$$I = \frac{1}{K}\sqrt{p}.$$

Les balances de M. Pellat sont comparables entr'elles à 0,01 pour 100 près.

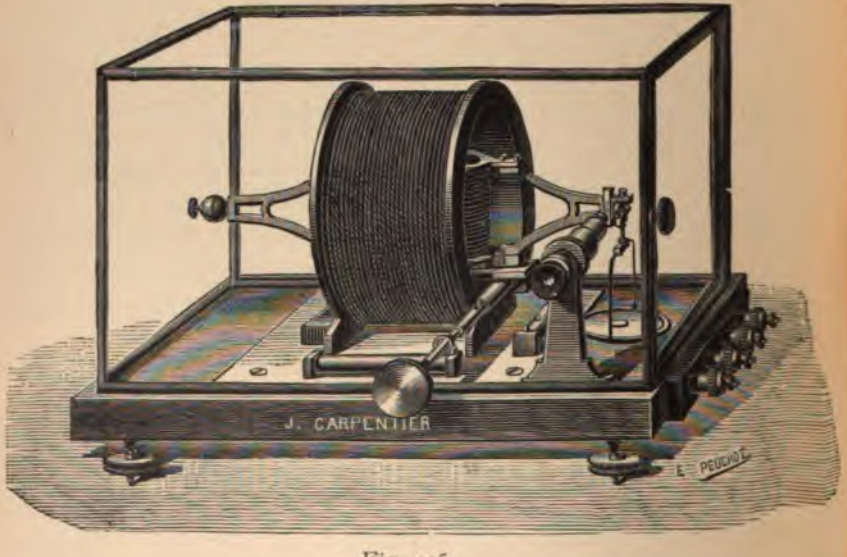


Fig. 105.

Le National Physical Laboratory d'Angleterre possède un appareil du même genre, dont les bobines sont enroulées sur des carcasses en marbre, filetées avec une grande perfection, et au moyen duquel on compte obtenir l'évaluation de l'ampère à 0,02 pour 100 près.

Chapitre IX.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Méthodes indirectes. — Pour mesurer la force électromotrice des générateurs électriques et déterminer la différence entre les potentiels de deux points d'un conducteur parcouru par un courant, on peut recourir à des méthodes basées sur l'emploi des galvanomètres.

Considérons le dernier cas et supposons qu'il s'agisse d'un courant continu d'intensité constante.

A défaut d'étalon de force électromotrice, il est possible d'utiliser les méthodes de mesure absolues ci-après.

1) On évalue séparément l'intensité du courant au moyen d'un galvanomètre ou d'une balance électrodynamique et la résistance comprise entre les points dont on cherche la différence de potentiel. Le produit des deux valeurs trouvées représente la grandeur cherchée.

2) On charge un condensateur étalon en reliant ses armatures aux deux points considérés et on le décharge ensuite dans un galvanomètre balistique, dont on a déterminé la durée d'oscillation sans amortissement T_0, la constante permanente k et le décrément logarithmique λ. On a, en appelant c la capacité

du condensateur, V la différence de potentiel cherchée et α_1 l'élongation première du galvanomètre, la relation

$$q = cV = \frac{T_0}{\pi}\frac{1}{k}\alpha_1\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right),$$

d'où l'on déduit V.

En prenant la différentielle logarithmique de l'expression de V et en négligeant la correction pour l'amortissement, il vient

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{dk}{k} - \frac{dc}{c},$$

de sorte que, si toutes les erreurs s'ajoutent, l'erreur relative limite du résultat est

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} + \frac{dk}{k} + \frac{dc}{c}.$$

On voit qu'il est difficile d'estimer V avec exactitude par ce moyen.

Méthodes directes. Méthode de déviation. — Le plus souvent on détermine les différences de potentiel par comparaison avec la force électromotrice d'une pile étalon.

Ce procédé permet une exactitude plus grande que la méthode précédente. Au lieu de calculer la constante balistique du galvanomètre, on l'élimine en chargeant, dans une seconde expérience, le condensateur à l'aide de la pile étalon, de force électromotrice e. On obtient ainsi les équations

$$q = cV = \frac{\alpha_1}{K},$$

$$q' = ce = \frac{\alpha'_1}{K};$$

d'où l'on tire

$$V = e\frac{\alpha_1}{\alpha'_1}.$$

Les connexions sont établies par l'intermédiaire d'une clef de décharge C, comme l'indique la fig. 106. On se sert d'une clef d'inversion pour obtenir des élongations de part et d'autre

du milieu de l'échelle et éliminer l'influence des déplacements du zéro. Il faut avoir soin de relever la clef de décharge avant la clef d'inversion, car, si l'on procédait dans l'ordre inverse, le condensateur se déchargerait par celle-ci. La détente du

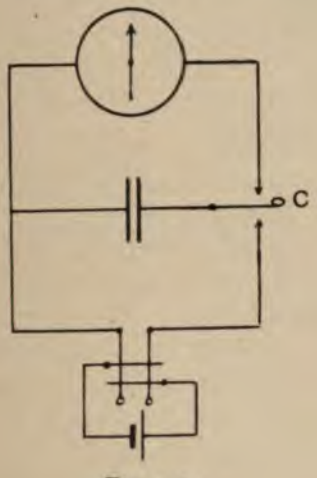


Fig. 106.

ressort de la clef de décharge doit être brusque, afin de réduire la perte d'électricité pendant que le condensateur est isolé. Il convient que la durée de charge soit la même dans les deux expériences, pour que le diélectrique absorbe des quantités correspondantes d'électricité. En vue de diminuer l'erreur provenant du résidu du diélectrique, il vaut mieux opérer par décharge qu'en plaçant le galvanomètre dans le circuit de charge.

La différentielle logarithmique de l'expression de V est

$$\frac{dV}{V} = \frac{de}{e} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{d\alpha'_1}{\alpha'_1}.$$

L'erreur relative limite sur V s'obtient en supposant que les erreurs de lecture s'ajoutent, c'est-à-dire en changeant le signe de $d\alpha'_1/\alpha'_1$. On se place évidemment dans les meilleures conditions en faisant en sorte que les élongations soient maxima. Pour cela on choisit, dans un condensateur gradué, des capa-

cités convenables. Il est possible de modifier les élongations en réglant un shunt disposé entre les bornes du galvanomètre, mais il faut alors tenir compte du terme correctif pour l'amortissement, à moins qu'on ne se serve d'un shunt universel.

La méthode examinée, se pratiquant à circuit ouvert, a l'avantage de n'exiger qu'une dépense d'électricité négligeable. A ce titre, elle se recommande spécialement pour la mesure de la force électromotrice des piles très polarisables.

Méthode du voltmètre. — La méthode du voltmètre est la plus employée dans la pratique lorsqu'une grande approximation n'est pas requise et qu'il s'agit de suivre les variations des différences de potentiel. Nous indiquerons ici le principe de la méthode, en réservant la description des appareils industriels pour un chapitre spécial.

Aux deux points dont on cherche la différence de potentiel V, pôles d'une pile, bornes d'une dynamo ou extrémités d'un conducteur parcouru par un courant, on relie un galvanomètre, auquel on ajoute une résistance assez grande pour que le courant qui passe dans l'instrument ne modifie pas d'une manière appréciable la différence de potentiel à évaluer. On obtient une déviation α, telle que

$$i = \frac{V}{r} = \frac{\alpha}{k},$$

r étant la résistance totale du galvanomètre et des bobines en série avec celui-ci.

En opérant de même avec un élément étalon de force électromotrice e, on a

$$i' = \frac{e}{r} = \frac{\alpha'}{k}.$$

Par suite,

$$V = e \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

La discussion de cette méthode se conduit comme celle de la méthode balistique précédente. La précision qu'on peut atteindre est plus grande que dans cette dernière, parce que

l'observation des déviations permanentes entraîne une erreur moindre que celle des élongations balistiques.

Si l'erreur de lecture s'élève à 0,01 par exemple, il faut veiller à ce que le courant débité par la pile étalon ne modifie pas la force électromotrice de celle-ci au point d'occasionner une erreur du même ordre. Ainsi, avec l'élément Clark à vase poreux, on doit mettre en circuit une résistance de 100000 ohms et l'on shunte le galvanomètre, s'il est trop sensible.

Dans le cas où l'on utilise un galvanomètre à réflexion dont les indications sont proportionnelles aux courants, on facilite les mesures, si celles-ci sont nombreuses, en réglant la résistance additionnelle et le shunt de telle manière qu'une division représente un volt ou un multiple exact du volt. On réalise de la sorte un *voltmètre*, qui permet la détermination des différences de potentiel par de simples lectures.

On ne perdra pas de vue, en employant un tel instrument, que la résistance de son circuit doit être suffisamment grande pour que le courant qui le traverse ne modifie pas sensiblement la différence de potentiel à évaluer. Si celle-ci est prise aux extrémités d'un conducteur ayant 0,01 ohm de résistance, on ne commet qu'une erreur de 0,001 en faisant usage d'un voltmètre dont la résistance ne vaut que 10 ohms. Si, au contraire, on mesure la force électromotrice d'une pile dont la résistance intérieure est 5 ohms, le même appareil donne lieu à une forte erreur, puisque, dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes de la pile en circuit avec le voltmètre est, non pas e, mais $10\,e/15 = 0{,}67\,e$

Il ne faut pas oublier davantage que la graduation d'un voltmètre ne reste correcte qu'à la condition que la résistance de l'instrument demeure invariable. Pour éviter les modifications de résistance dues au courant ou aux variations de la température ambiante, il est recommandable de n'utiliser pour l'enroulement de ces instruments, ainsi que pour leurs shunts et résistances en série, que des alliages, tels que le maillechort ou la manganine, sur lesquels l'effet des changements de température est faible ou nul. De plus, on aura soin de ne laisser passer le courant que pendant le temps nécessaire aux lectures,

afin de ne pas permettre un échauffement excessif. On peut négliger l'influence de la température avec un galvanomètre à bobine en cuivre, si celle-ci a une résistance très petite comparativement à la résistance additionnelle faite en maillechort ou manganine.

Il est aisé d'étendre les limites d'emploi d'un voltmètre en modifiant, par des résistances en série, la résistance totale du circuit de l'appareil. Si, à une résistance r, correspond 1 division par volt, une résistance $10\,r$, obtenue par l'addition de $9\,r$ en série, porte la valeur d'une division à 10 volts.

Lorsqu'on se sert du galvanomètre Deprez et d'Arsonval comme voltmètre, il convient d'utiliser un shunt, afin d'amortir les oscillations, à moins que la bobine ne soit enroulée sur un cadre en aluminium, dans lequel se développent des courants induits amortisseurs. On peut agir sur le shunt pour changer la sensibilité du voltmètre. Avec une bobine mobile en maillechort enroulée sur un cadre d'aluminium et quelques résistances en série et en dérivation également en maillechort, on est à même de mesurer toutes les tensions usitées dans les applications. Une telle combinaison peut être employée pour graduer les voltmètres industriels à courant continu.

Méthodes de zéro. Méthode d'opposition de Poggendorff. Potentiomètres de Clark, de Crompton et d'Arnoux. Ponts de compensation de Feussner et de Carpentier. — Nous examinerons avec quelques détails la méthode d'opposition, qui compte parmi les plus fécondes et les plus précises. Le principe en a été indiqué par Poggendorff, mais elle a reçu de divers électriciens des perfectionnements formant la base d'appareils pratiques, appelés *potentiomètres* et *ponts de compensation*, qui doivent figurer dans tous les laboratoires. Ces appareils, qui comportent des résistances et des forces électromotrices étalons, sont propres aussi bien à la comparaison des différences de potentiel qu'à celle des intensités de courant; ils conviennent même à la comparaison des résistances.

Les méthodes de zéro dont nous allons nous occuper procurent une grande exactitude parce qu'elles utilisent le galva

nomètre au voisinage de la position de repos de l'équipage nobile et permettent par suite de donner à l'instrument toute sa sensibilité, tandis que, dans les méthodes procédant par comparaisons successives, on est ordinairement obligé d'atténuer la sensibilité du galvanomètre par des shunts. Les méthodes de zéro rendent possible l'emploi de galvanomètres dont la loi n'est pas connue.

Pour fixer les idées, nous supposerons, dans ce qui suit, qu'il s'agit de déterminer la force électromotrice d'une pile par comparaison avec celle d'un élément étalon.

Soient e et e' les deux forces électromotrices. On met la pile dont la force électromotrice est la plus grande, et que nous supposerons peu polarisable, en circuit avec deux résistances variables r et r', qu'on règle jusqu'à ce qu'un galvanomètre, mis en série avec l'autre pile comme l'indique la fig. 107, ne dévie plus. On abaisse d'abord la clef k_1, puis la clef k_2 et

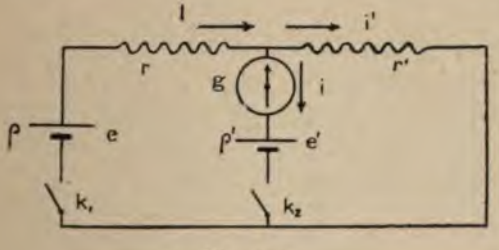


Fig. 107.

on relève les deux clefs, en commençant par k_2, aussitôt qu'on a constaté la déviation.

En appelant ρ et ρ' les résistances des deux piles, on trouve, par l'application des lois de Kirchhoff,

$$\begin{aligned} I &= i + i', \\ e &= I(\rho + r) + i' r', \\ e' &= i' r' - i(\rho' + g); \end{aligned}$$

d'où l'on tire, en éliminant i' et I,

$$i = \frac{e r' - (\rho + r + r') e'}{r(\rho + r) + (\rho' + g)(\rho + r + r')} = \frac{\alpha}{k}. \qquad (1)$$

Lorsque la déviation α s'annule, $i = o$, de sorte que

$$\frac{e}{e'} = n = \frac{\rho + r + r}{r'}. \qquad (2)$$

En supposant r fixe et r' variable, on déduit de (2)

$$\frac{dn}{n} = \frac{(\rho + r)\, dr'}{n\, r'^2}.$$

Cette valeur est minima quand r' et, par suite, r sont les plus grands, ces deux quantités étant liées par l'équation

$$r = r'(n - 1) - \rho.$$

Lorsqu'on dispose d'un galvanomètre sensible, on choisit les résistances r et r' assez élevées pour qu'une variation de r' égale à 1 ohm n'occasionne qu'une faible déviation. En général, on peut alors négliger la résistance ρ et dn/n est inférieur à $r/(r + r')\, r'$.

Si des résistances r' et $r' + 1$ occasionnent des déviations α et α' de sens opposés, on peut, à la condition que les courants i' soient peu différents, employer la formule d'interpolation et admettre que la résistance correspondant au zéro du galvanomètre est $r' + \alpha(\alpha + \alpha')$. En effet, on a, dans ce cas, avec la résistance $r' + 1$,

$$i'(r' + 1) - e' = \frac{\alpha'}{k}\, g,$$

en admettant que g soit la seule résistance à considérer dans la branche du galvanomètre. Avec la résistance r', on a

$$i' r' - e' = -\frac{\alpha}{k}\, g.$$

De là, on déduit

$$\frac{i'(r' + 1) - e'}{i' r' - e'} = -\frac{\alpha'}{\alpha}$$

et

$$\frac{i'}{i' r' - e'} = -\frac{\alpha - \alpha'}{\alpha}$$

ou

$$r' + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'} = \frac{e'}{i'}.$$

On peut discuter ce résultat en faisant intervenir les erreurs de lecture.

Si la variation du courant i' est sensible dans les deux essais, la formule ci-dessus est en défaut. Il faut alors disposer entre les boîtes r et r' un fil à curseur permettant d'annuler la déviation du galvanomètre. Si l'on veut, dans ces conditions, connaître l'influence d'une erreur de lecture, il suffit de considérer α comme variable dans l'équation (1), qui devient, en supposant p et p' négligeables,

$$i = \frac{n e' r' - (r + r') e'}{r^2 + g(r + r')} = \frac{\alpha}{k}.$$

On trouve, en introduisant la condition (2),

$$\frac{dn}{n} = \frac{d\alpha}{k} \frac{r^2 + g(r + r')}{e'(r + r')}.$$

On voit qu'on doit choisir un galvanomètre aussi sensible que possible.

La variation du courant amenée par la polarisation de la pile intercalée dans le circuit principal est souvent la cause d'erreur la plus importante dans la mesure étudiée.

Lorsque la pile e' est très sujette à se polariser, comme c'est le cas pour l'élément Clark, on commence le réglage en introduisant en série avec le galvanomètre une grande résistance, qu'on diminue progressivement à mesure qu'on approche de l'équilibre. Quand ce dernier est atteint, on laisse reposer la pile pour faire disparaître toute trace de polarisation, après quoi l'on vérifie si l'équilibre subsiste.

Si la force électromotrice e de la pile non polarisable est inférieure à e', on réunit plusieurs éléments en série, après s'être assuré, par une mesure préalable, que les divers couples ont la même force électromotrice. Ainsi, pour comparer la pile Daniell à l'élément Clark avec vase poreux, on utilise deux couples au sulfate de cuivre. On a d'ailleurs soin de placer une

résistance de 100 000 ohms en série avec l'étalon Clark pour commencer le réglage.

Quand on ne dispose pas de résistances r et r' assez grandes pour permettre de négliger la résistance ρ, on établit un second régime d'équilibre en ajoutant respectivement à r et à r' des résistances r_1 et r'_1. On obtient ainsi une nouvelle relation

$$\frac{e}{e'} = \frac{\rho + r + r_1 + r' + r'_1}{r' + r'_1} \qquad (3)$$

et de la comparaison des équations (2) et (3) on déduit

$$\frac{e}{e'} = \frac{r_1 + r'_1}{r'_1}.$$

Il faut toujours avoir soin de tenir la clef de la pile principale abaissée assez longtemps pour que cette dernière prenne son régime permanent.

En vue d'éviter l'élément d'incertitude qu'apportent la variation de la force électromotrice de la pile principale et la résistance de celle-ci, on utilise de préférence en e une pile auxiliaire, qui peut être formée de quelques éléments secondaires de résistance négligeable, qu'on maintient en circuit pendant un temps convenable pour éliminer le coup de fouet du début de la décharge, et l'on introduit en série avec le galvanomètre successivement les deux éléments e' et e'_1 dont les forces électromotrices doivent être comparées. Si e' est un étalon Weston de force électromotrice égale à 1,019 volt, on commence par déboucher une résistance r' dont la valeur numérique en ohms est un multiple de 1,019, soit 1 019 ohms, et l'on cherche la résistance r qui maintient le galvanomètre au zéro avec l'élément étalon. On substitue ensuite à celui-ci la pile inconnue e'_1 et l'on règle les résistances correspondantes r'_1 et r_1 de telle manière que la somme $r_1 + r'_1$ soit égale à $r + r'$ et que le courant fourni par e ne change pas. On a alors

$$\frac{e}{e'_1} = \frac{r'_1}{1\,000}.$$

On se trouvera bien de l'emploi de deux boîtes de résistances de 10 000 ohms pour le réglage, une résistance de 100 000 ohms étant mise en série avec l'élément étalon au début des tâtonnements.

Avec un galvanomètre sensible réduisant l'importance des erreurs de lecture, une batterie de quelques accumulateurs donnant un courant constant, ainsi que des résistances et un couple étalon bien calibrés, on atteint facilement une approximation de 0,1 pour 100 dans la méthode de Poggendorff.

Le potentiomètre de Clark ramène la comparaison de deux forces électromotrices à celle de deux longueurs.

Une pile auxiliaire E ou un accumulateur, capable de fournir un courant constant, est placée en circuit avec un rhéostat *a* et un conducteur résistant A B. On choisit souvent un fil de platine iridié, de 0,15 à 0,1 mm de diamètre, dont la résistance vaut 10 à 20 ohms par mètre. Les deux piles *e* et *e'* à comparer sont mises, comme le montre la fig. 108, en dérivation avec des galvanomètres G et G' sur des parties du conducteur A B. On

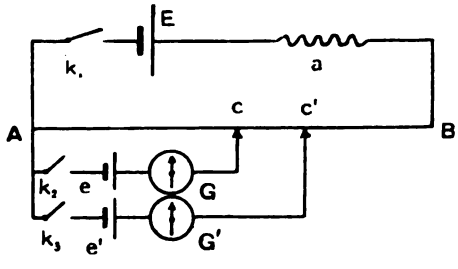


Fig. 108.

règle la position des curseurs *c* et *c'* jusqu'à ce que les galvanomètres reviennent au zéro. En désignant par *i* le courant que débite la pile E, par *r* et *r'* les résistances A *c* et A *c'*, on a alors

$$e = i\,r,$$
$$e' = i\,r';$$

d'où

$$\frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}.$$

Il est facile à voir que la précision de la mesure dépend de l'approximation avec laquelle on peut évaluer les résistances r et r', c'est-à-dire de la sensibilité des galvanomètres et de la plus petite fraction appréciable de la résistance du conducteur A B.

Pour effectuer l'essai, on règle d'abord la position du curseur c en observant le galvanomètre G, puis celle du curseur c' à l'aide du galvanomètre G'. On pourrait se passer du galvanomètre G', car, si la position du curseur c' n'est pas réglée, un courant traverse l'appareil G au moment où l'on abaisse la clef k_3, par suite de la variation de potentiel que le courant passant par e' détermine en c. Toutefois, on obtient plus de sensibilité avec deux instruments. Si l'on ne possède qu'un appareil, il est préférable de placer les deux piles à comparer successivement dans le même circuit dérivé, dont on règle le curseur pour avoir l'équilibre dans les deux cas. Ce procédé suppose que le courant de la pile E demeure bien invariable. Pour s'en assurer, on dispose un commutateur permettant de substituer rapidement la pile e' à la pile e et on alterne les opérations.

La méthode considérée peut entraîner une erreur relative assez forte lorsque la longueur du fil calibré n'est pas très grande Dans le potentiomètre de Clark modifié par M. Crompton, la résistance A B est constituée par un long fil tendu suivant une règle divisée et mis en série avec 14 bobines de même résistance que le fil. Celui-ci ne sert que pour achever le réglage, réalisé d'une manière grossière avec les bobines.

Le fil est divisé en 1 000 parties d'égale résistance, dans lesquelles une pile a entretient un courant constant, fig. 109. On ajuste le courant, à l'aide d'un rhéostat à plots G et d'un rhéostat continu G I, de manière que la différence de potentiel aux extrémités de l'ensemble des 14 bobines et du fil divisé soit 1,5 volt. Dans ces conditions, la différence de potentiel correspondant à 1 division vaut 0,0001 volt. Pour arriver à ce résultat, on utilise un élément Clark à vase poreux L C, dont la force électromotrice à 15° C est 1,433 volt, et on règle les rhéostats de telle sorte que le galvanomètre, relié comme l'indique la figure, reste au zéro quand la manette des bobines

se trouve sur la touche 14 et le curseur du fil sur la division 330. Si, au lieu d'employer l'élément Clark, dont la force électromotrice est toujours comprise entre 1,4 et 1,5 volt, on se servait de l'élément Weston, on ne prendrait que 10 bobines additionnelles.

En vue d'évaluer à l'aide de l'appareil des différences de potentiel supérieures à 1,5 volt, on les applique à une grande résistance, dont on oppose une partie connue, la centième par exemple, au fil calibré.

S'agit-il de déterminer des courants plus ou moins intenses, on fait passer ceux-ci dans des résistances étalons, choisies de manière à créer une tension inférieure à 1,5 volt, et l'on introduit cette tension dans la dérivation du galvanomètre.

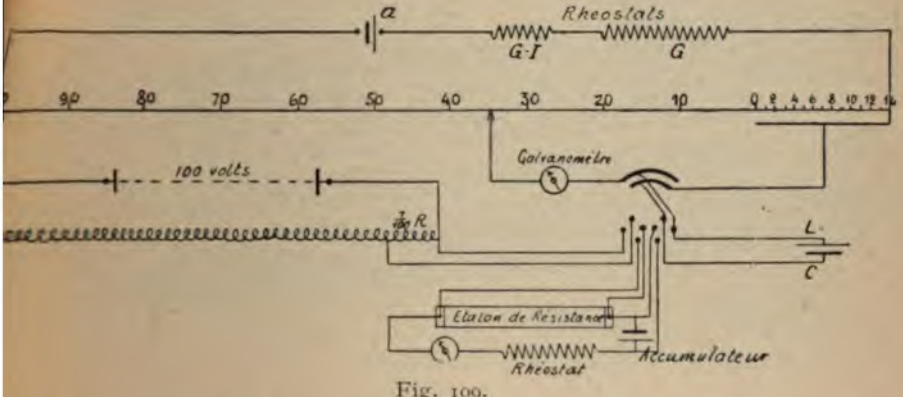


Fig. 109.

Le dispositif peut encore servir à la graduation des résistances. Dans ce but, on envoie un même courant dans une résistance connue r et dans la résistance cherchée x. Au moyen du potentiomètre on compare les tensions e et e' existant aux bornes de r et x. Les rapports e/e' et r/x sont égaux.

La fig. 110 représente la forme portative donnée au potentiomètre par MM. Arnoux et Chauvin. La boîte principale comporte à l'avant un fil calibré, muni d'un conducteur de compensation destiné à corriger les variations de l'élément Clark. A l'arrière sont 15 sections ayant chacune une résistance égale à celle du fil divisé. Vers le milieu on voit deux couples

Clark avec thermomètre. A gauche se trouvent un galvanoscope sensible avec loupe et une résistance de 100 000 ohms. La petite boîte contient deux éléments secondaires, capables de produire un courant constant de 0,05 ampère environ.

Les potentiomètres à fil laissent parfois une certaine incertitude, parce que la résistance totale en circuit est peu élevée et prête à une variation du courant. Avec les ponts de compensation à bobines on évite cet inconvénient, mais il faut faire usage de galvanomètres plus sensibles.

M. Feussner (1) a combiné un pont de compensation qui

Fig. 110.

permet de mesurer, avec une approximation de 0,1 pour 100, toutes les tensions comprises entre 0,014 et 1 400 volts, ainsi que, si l'on dispose de résistances étalons de forte section, toutes les intensités de courant à partir de 0,0001 jusque 1 000 ampères.

La figure 111 montre le schéma de cette disposition, qui comporte un élément étalon Clark p du modèle de la Reichsanstalt servant de base de comparaison pour les tensions, une résis-

(1) Feussner, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. 1890.

tance A de 100 000 ohms, une boîte de résistances B à fiches contenant 99 990 ohms, un rhéostat à manette C comprenant 9 résistances de 1 000 ohms, une caisse de résistances à fiches D' graduée de 0,1 à 50 ohms et un rhéostat à manette E formé de 9 bobines de 100 ohms. Une dernière boîte D, présentant les principales résistances de D', est encore adjointe au système, en vue de permettre de maintenir sensiblement constant le courant débité par une pile auxiliaire P dans le circuit principal : à cet effet, on bouche en D les résistances débouchées en D'

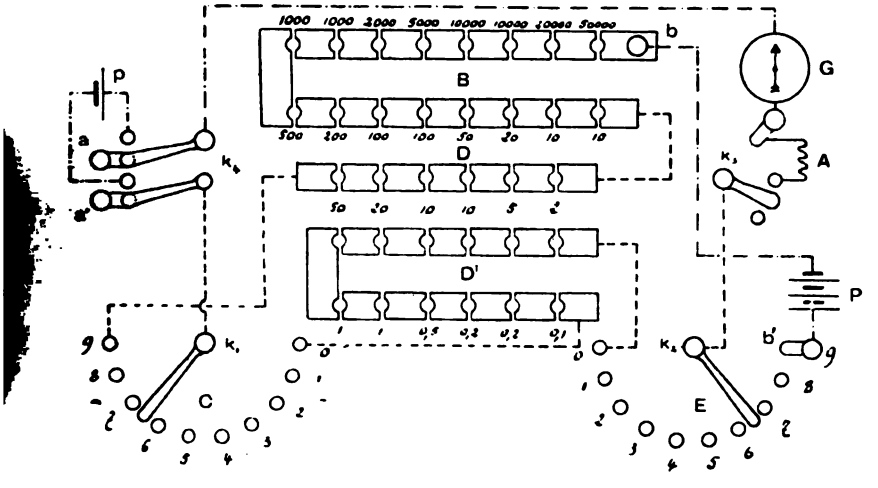


Fig. 111.

pour le réglage. Dans un modèle récent, un enclanchement donne le moyen d'effectuer cette double opération par une seule manœuvre.

Pour comparer un élément de pile à l'étalon Clark, on agit sur les manettes k_1 et k_2, ainsi que sur les résistances D', de façon à obtenir l'équilibre du galvanomètre G lorsque le commutateur k_4 est raccordé successivement à l'élément Clark et à la pile étudiée en relation avec les bornes a et a'. Afin d'éviter la polarisation du couple Clark, on commence les tâtonnements en introduisant, à l'aide de la clef k_3, les 100 000 ohms à la suite

du galvanomètre. On ne supprime cette résistance additionnelle que pour le réglage définitif.

Si l'on doit déterminer une différence de potentiel, inférieure à 14 volts, existant entre deux points d'un circuit parcouru par un courant continu, on relie également ces points aux bornes a et a', pour procéder comme ci-dessus. Si la résistance totale du circuit de la pile auxiliaire P vaut 100 000 ohms et si une résistance r comprise entre les manettes k_1 et k_2 assure le repos du galvanomètre lorsque la clef k_4 est connectée au couple étalon, on a, en désignant par e la force électromotrice de la pile auxiliaire,

$$\frac{e}{100\,000} = \frac{1{,}433 - 0{,}001\,(t^0 - 15^0)}{r} = \frac{1{,}448 - 0{,}001\,t^0}{r}.$$

V désignant, d'autre part, la différence de potentiel cherchée, pour laquelle l'équilibre est obtenu au moyen d'une résistance r',

$$\frac{e}{100\,000} = \frac{V}{r'};$$

d'où

$$V = (1{,}448 - 0{,}001\,t^0)\,\frac{r'}{r}.$$

Pour estimer les différences de potentiel comprises entre 14 et 1400 volts, on les applique aux bornes b et b' auxquelles, dans le cas précédent, était raccordée la pile auxiliaire. Dans ces conditions,

$$V = \frac{(1448 - t^0)\,100}{r}.$$

Enfin, dans le but d'évaluer l'intensité des courants à l'aide de l'appareil de M. Feussner, on fait passer ceux-ci dans des résistances étalonnées de valeur convenable, aux bornes desquelles on mesure la différence de potentiel. Le rapport de la tension observée à la résistance de l'étalon fait connaître l'intensité cherchée. Les résistances destinées à la mesure de courants intenses sont composées de bandes en manganine immergées dans du pétrole refroidi par l'agitation.

Le pont de compensation de M. Carpentier, dont la fig. 112 montre le dispositif commode de manœuvre à manettes, permet la mesure de 0,0001 à 600 volts.

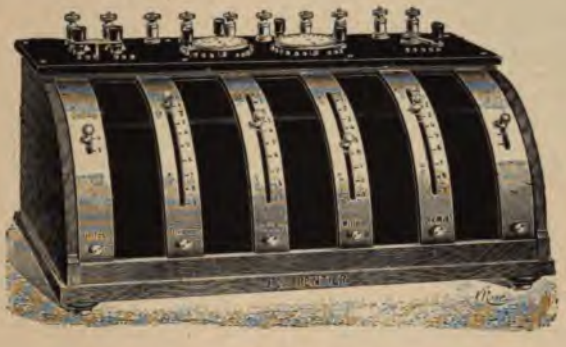


Fig. 112.

Variantes de la méthode d'opposition. Emploi des balances électrodynamiques. Méthode de Lacoine. — Si l'on n'a pas d'élément étalon à sa disposition ou si l'on doit vérifier un tel étalon, on peut déterminer avec une balance électrodynamique le courant produit par une pile auxiliaire dans une résistance variable r et opposer, par l'intermédiaire d'une boîte de 100 000 ohms, d'un galvanomètre et d'une clef, à la différence de potentiel réalisée aux bornes de cette résistance la force électromotrice e à évaluer. Lorsque le réglage de r a amené l'équilibre, il suffit d'appliquer la relation $e = ir$. L'erreur limite commise sur e est la somme des erreurs qu'entraînent les mesures de i et de r. Comme dans la méthode de Poggendorff, il faut adopter un galvanomètre très sensible.

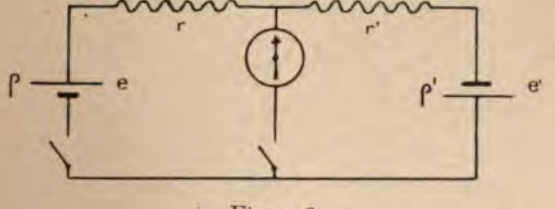


Fig. 113.

Une autre variante de la méthode de Poggendorff a été suggérée par Lacoine. Elle consiste à reporter la pile e', à laquelle on compare la pile e, à la suite de la résistance r', au lieu de la placer dans la branche du galvanomètre, fig. 113. Cette disposition met les deux piles dans les mêmes conditions de débit en les reliant en tension. Elle ne peut pas convenir si l'une des piles est très polarisable. En appliquant les lois de Kirchhoff, il est aisé de voir que le courant s'annule dans le galvanomètre lorsque la condition suivante est satisfaite :

$$\frac{e}{e'} = \frac{r + \rho}{r' + \rho'}.$$

Cette méthode donne lieu à une discussion semblable à celle de la méthode d'opposition.

Chapitre X.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROSTATIQUES.

Mesure indirecte par l'électromètre absolu de Lord Kelvin. — Lord Kelvin a imaginé une méthode pour la détermination des potentiels électriques sans l'emploi d'étalons de force électromotrice.

La fig. 114 montre le principe de l'appareil utilisé. Un condensateur est formé d'une armature fixe B et d'une armature A dans laquelle on a séparé, par une rainure étroite, un disque

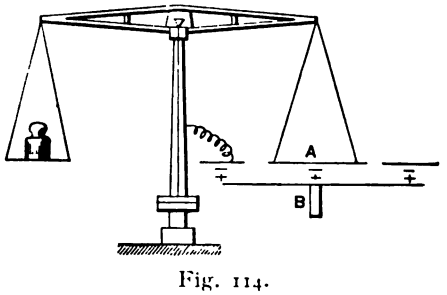


Fig. 114.

remplaçant un des plateaux d'une balance. L'armature inférieure est reliée au corps dont on cherche le potentiel, tandis que le disque est mis en communication avec le sol.

Il faut tenir compte du fait que la liaison indiquée abaisse le potentiel du corps, si ce dernier n'est pas en rapport avec une source d'électricité. En effet, la charge du corps se partage alors entre celui-ci et l'armature proportionnellement aux capacités correspondantes, qu'il faut connaître pour calculer la réduction du potentiel après la réunion. Les fils de connexion doivent être de capacité négligeable pour éviter une nouvelle correction. On utilisera, par exemple, des conducteurs minces, supportés par des fils de soie et tenus à distance des masses conductrices voisines.

En appelant V le potentiel de l'armature fixe, exprimé en unités C. G. S. électromagnétiques, s la surface du disque suspendu en cm^2 et r l'écartement des armatures en cm, la force attractive exercée sur l'équipage mobile est, en dynes,

$$p = \frac{V^2 s}{8 \pi K r^2},$$

si l'on pose $K = 3^2 \times 10^{20}$. On déduit de là

$$V = \sqrt{\frac{8 \pi K p r^2}{s}}.$$

Lord Kelvin a réalisé des balances très sensibles pour mesurer les attractions électrostatiques toujours faibles. Ces appareils ne conviennent toutefois que pour l'évaluation de potentiels très élevés. Leur maniement est d'ailleurs délicat, ce qui a beaucoup restreint leurs applications. Ils peuvent servir pour étalonner des instruments à graduation empirique destinés à la mesure de hauts voltages. En usage courant, les électromètres sont réservés aux méthodes de mesure relatives.

Principe de l'électromètre à quadrants employé pour la mesure directe des potentiels. — Un cylindre de cuivre, représenté en plan dans la fig. 115, est divisé en quatre parties A, B, C, D. Les quadrants opposés sont reliés entr'eux à l'aide de fils conducteurs. Un autre fil métallique mince supporte librement un cadre E composé de deux palettes cylindriques réunies à la partie supérieure et à la partie inférieure par des entre-

toises. Les déviations du cadre sont observées par réflexion. Dans sa position normale le plan de symétrie du cadre passe par une des lignes de séparation des quadrants.

Supposons qu'on raccorde le cadre au sol par l'intermédiaire du fil de suspension et qu'on porte les deux paires de quadrants à des potentiels égaux et contraires. Le cadre s'électrise par influence ; il est sollicité également dans les deux sens et reste immobile.

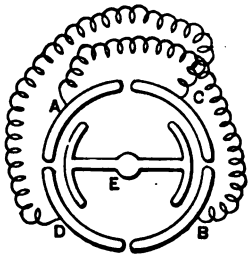


Fig. 115.

Mais, si le cadre reçoit une charge positive, il se déplace aussitôt vers les quadrants négatifs. Si sa charge est négative, il dévie du côté des quadrants positifs.

Soient, d'une manière générale, V le potentiel du cadre, V_1 celui des quadrants A et B, V_2 celui des quadrants C et D. Le cadre constitue un condensateur avec chacune des paires de quadrants. La charge du condensateur correspondant aux quadrants A et B est proportionnelle à $V - V_1$ et le couple électrostatique qui tend à mouvoir le cadre vers les quadrants considérés peut être représenté par $a\,(V - V_1)^2$, a étant un coefficient constant si le déplacement est assez petit pour que la capacité puisse être regardée comme invariable. Le cadre est sollicité dans le sens opposé par un couple électrostatique égal à $a\,(V - V_2)^2$, la constante a étant la même eu égard à la faible rotation du cadre et à l'identité de forme des quadrants. Le couple résultant est

$$a\,(V_2 - V_1)\,(2\,V - V_1 - V_2).$$

Il est équilibré par le couple de torsion du fil, proportionn à l'angle de déviation α. On peut donc écrire

$$\alpha = k\,(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right).$$

M. Gouy a montré que la formule précédente est en défau lorsque les potentiels des quadrants sont considérables rela tivement à celui du cadre. Il existe effectivement un couple directeur électrique, qui agit en même temps que le couple de torsion et dont il y a lieu de tenir compte dans ce cas. (1)

Dans l'emploi de l'électromètre à quadrants, divers cas sont à distinguer qui permettent de simplifier la formule ci-dessus.

1) Lorsque, comme dans l'hypothèse faite au début, les paires de quadrants sont maintenues à des potentiels égaux et opposés, ce qu'on peut obtenir en les reliant aux deux pôles d'une pile bien isolée comportant un nombre pair d'éléments dont le milieu de la série est mis à la terre, $V_1 = -V_2$ l'on a

$$\alpha = 2\,k\,VV_2. \qquad (1)$$

---

(1) Soient c_1 et c_2 les capacités des deux condensateurs constitués par cadre et chacune des paires de quadrants, c_{12} la capacité du condensateur correspondant aux deux paires de quadrants. Ces capacités dépendent réalité de l'angle α et, d'après la formule de Mac-Laurin, on peut poser se contentant des trois premiers termes du développement,

$$c_1 = k_1 + \alpha\,k'_1 + \frac{\alpha^2}{2}\,k''_1,$$

$$c_2 = k_2 + \alpha\,k'_2 + \frac{\alpha^2}{2}\,k''_2,$$

$$c_{12} = k_{12} + \alpha\,k'_{12} + \frac{\alpha^2}{2}\,k''_{12}.$$

L'énergie potentielle du système a pour expression

$$w = \frac{1}{2}\left[c_1\,(V - V_1)^2 + c_2\,(V - V_2)^2 + c_{12}\,(V_1 - V_2)^2\right]$$

et le couple déviant $-dw/d\alpha$ est équilibré par la réaction de torsion suspension. Par suite,

$$\alpha = -\frac{dw}{d\alpha} = -\frac{1}{2}\left[(V - V_1)^2\,\frac{dc_1}{d\alpha} + (V - V_2)^2\,\frac{dc_2}{d\alpha} + (V_1 - V_2)^2\right.$$

$$\frac{1}{2}\left[(V - V_1)^2\,(k'_1 + \alpha\,k''_1) + (V - V_2)^2\,(k'_2 + \alpha\,k''_2) + (V_1 - V_2)^2\,(k'\right.$$

La déviation est alors proportionnelle au potentiel du cadre. Ce mode d'utilisation de l'électromètre constitue la *méthode hétérostatique*, ainsi appelée parce qu'on a recours à une source électrique étrangère à celle qui fait l'objet de la mesure.

2) Quand le potentiel du cadre est très grand relativement à ceux des quadrants, il vient sensiblement

$$\alpha = k\,(V_2 - V_1)\,V. \qquad (2)$$

3) Dans la *méthode idiostatique*, qui n'exige pas de source étrangère, on fait communiquer le cadre avec une des paires de quadrants, C D par exemple, de sorte que

$$V = V_2$$

et

$$\alpha = k\,(V - V_1)\left(V - \frac{V + V_1}{2}\right) = \frac{k}{2}(V - V_1)^2. \qquad (3)$$

La déviation est alors proportionnelle au carré de la différence des potentiels du cadre et des quadrants A B.

Comme la symétrie de l'appareil exige que la déviation change de sens, mais non de valeur, quand on remplace l'un par l'autre les potentiels V_1 et V_2, il faut que

$$k'_1 = -\,k'_2,$$
$$k'_{12} = 0,$$
$$k''_1 = k''_2.$$

Il vient donc

$$-\frac{1}{2}\,k'_2\left[-(V - V_1)^2 + (V - V_2)^2\right] - \frac{1}{2}\,\alpha\left\{k''_2\left[(V - V_1)^2 + (V - V_2)^2\right] + k''_{12}\,(V_1 - V_2)^2\right\}$$
$$= k'_2\,(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right) - \frac{1}{2}\,\alpha\left\{k''_2\left[(V - V_1)^2 + (V - V_2)^2\right] + k''_{12}\,(V_1 - V_2)^2\right\}.$$

Le second terme du second membre représente le couple directeur électrique. Il disparaît quand la déviation est suffisamment faible pour que, dans les expressions de c_1, c_2 et c_{12}, on puisse omettre les termes en α^2 ou lorsque les coefficients de ces termes sont négligeables. L'équation d'équilibre se réduit alors à

$$\alpha = k\,(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right).$$

On vérifie si le couple directeur électrique peut être laissé de côté à l'aide de piles étalons dont les forces électromotrices sont connues.

Les formules (1) et (2) peuvent être appliquées pour déterminer une différence de potentiel continue.

Quand on veut faire usage de la formule (1), le cadre est d'abord mis en communication avec un des pôles d'une pile étalon, dont l'autre pôle est relié au sol et au milieu de la pile de charge, fig. 116. La déviation α obtenue est proportionnelle à la force électromotrice e de l'élément étalon : $\alpha = Ae$. On répète l'expérience en mettant l'un des deux points dont on cherche la différence de potentiel en relation avec la terre et le milieu de la pile de charge, tandis que l'autre point est connecté au cadre. La nouvelle déviation α' est liée à la

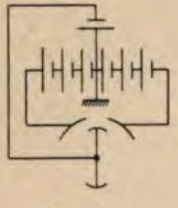


Fig. 116.

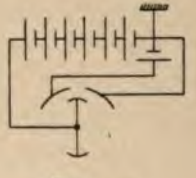


Fig. 117.

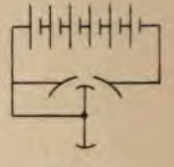


Fig. 118.

différence de potentiel v inconnue par l'égalité $\alpha' = Av$. Par suite,

$$v = \frac{\alpha'}{\alpha} e.$$

Pour électriser les quadrants, on se sert de petits éléments de pile à un liquide constitués au moyen d'éprouvettes ou de godets maintenus dans un lit de paraffine. On peut aussi employer de petits couples secondaires formés de fils en plomb plongeant dans une solution sulfurique au dixième. On réalise ainsi sous un volume réduit des piles produisant de hautes tensions. Si l'on désire être sûr que les pôles opposés de la pile de charge ont des potentiels égaux et contraires, on les réunit par une grande résistance (graphite, trait de platine sur verre) et on met le milieu de celle-ci, au lieu du milieu de la pile, à la terre.

Lorsqu'il s'agit d'utiliser la formule (2), on charge le cadre

à un potentiel élevé, par exemple en le faisant communiquer avec l'un des pôles d'une pile auxiliaire d'un grand nombre d'éléments, dont l'autre pôle est relié au sol ainsi qu'à un des pôles de la pile étalon raccordée aux paires de quadrants, fig. 117. On substitue ensuite à la pile étalon les deux points dont on veut évaluer la différence de potentiel.

Lord Kelvin a imaginé une petite machine électrostatique, appelée replenisher (1), capable d'électriser le cadre des électromètres à quadrants à un potentiel considérable.

Par suite de la faible intensité des forces électrostatiques, l'électromètre est un appareil peu sensible. Il n'est plus guère usité que pour la mesure des différences de potentiel très élevées, avec lesquelles les méthodes électromagnétiques présentent des inconvénients. Pour la détermination de tensions faibles et susceptibles d'être maintenues invariables, ces derniers procédés sont au contraire plus exacts et plus commodes.

L'évaluation des grandes différences de potentiel se fait suivant la formule (3). On relie le cadre à l'une des paires de quadrants et l'on compare la différence de potentiel cherchée v à une tension connue e, fig. 118. Il vient $\alpha = B v^2$ et $\alpha' = B e^2$; d'où

$$v = e \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha'}}.$$

Lorsque la différence de potentiel à mesurer varie périodiquement de sens, comme c'est le cas entre les extrémités d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs, la déviation correspondante est proportionnelle au carré moyen de ses valeurs instantanées et, par suite, si V désigne sa valeur efficace, on a

$$V = e \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha'}}.$$

Ordinairement le cadre mobile des électromètres est en

(1) Éric Gerard; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. VII. — Gauthier-Villars, Paris.

aluminium et les quadrants sont en laiton. Il s'ensuit une force électromotrice de contact, qui altère le résultat, dans le cas où l'on emploie la méthode idiostatique. On peut éliminer l'erreur en faisant deux expériences successives dans lesquelles la tension parasite produit des effets égaux et opposés. La moyenne des déviations obtenues correspond à la valeur cherchée.

Avant d'utiliser un électromètre, il est important de régler

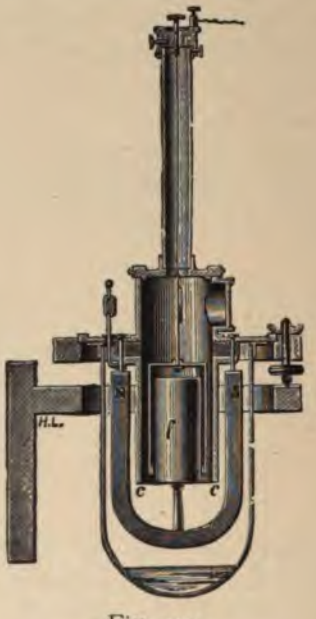


Fig. 119.

la symétrie des quadrants et de l'équipage mobile, d'abord à la vue et ensuite en examinant si des différences de potentiel égales et contraires appliquées aux deux paires de quadrants occasionnent des déviations de même amplitude du cadre relié au sol. Généralement un des quadrants peut être déplacé en vue d'assurer ce résultat.

On soustrait l'équipage mobile aux influences extérieures par une boîte métallique formant écran électrique autour de l'électromètre et percée de fenêtres laissant voir les parties à ajuster.

La cage est mise en communication avec la terre. Les quadrants et le cadre sont souvent supportés par des colonnettes en verre essuyées soigneusement avec un linge sec. Actuellement on préfère employer l'ambre, qui a l'avantage de ne pas être hygroscopique et qui constitue un des meilleurs isolants connus. Des colonnes à cannelures de cette substance donnent d'excellents résultats. L'intérieur de l'appareil doit être desséché par de l'acide sulfurique concentré, mais non fumant.

Modèles d'électromètres à quadrants de M. Edelmann, de Lord Kelvin, de M. Mascart et de l'auteur. — La fig. 119 représente l'électromètre à quadrants de M. Edelmann, modifié par l'auteur afin de rendre le mouvement du cadre apériodique. Dans ce but, les quadrants sont embrassés par un aimant en fer à cheval N S, dont le flux magnétique est concentré par une pièce en fer doux *f*. Le cadre est fermé à la partie inférieure par une entretoise en forme d'anneau, qui joue librement autour du noyau *f*. Les courants induits développés dans le cadre pendant son mouvement amortissent complètement les oscillations. Au fond de l'enveloppe en verre qui entoure le système, on verse de l'acide sulfurique concentré pour dessécher l'atmosphère de l'appareil. Les lectures se font par réflexion.

L'électromètre de M. Edelmann présente l'inconvénient de ne pas permettre le déplacement des quadrants pour corriger éventuellement un léger défaut de symétrie dans la position du cadre. L'auteur a obvié à ce défaut en utilisant la disposition décrite à propos de son galvanomètre différentiel. Il lui a suffi de remplacer la bobine de ce dernier par un cadre en aluminium et de fixer les quadrants aux pièces polaires réglables, recouvertes au préalable d'une chemise isolante, fig. 120. Le noyau en fer, qui a pour but de concentrer les lignes de force de l'aimant dans l'espace où se meut le cadre en vue d'amortir les oscillations de celui-ci, est également revêtu d'une enveloppe isolante et pourvu de quatre quadrants disposés en regard des quadrants extérieurs et reliés à ces derniers de manière à renforcer leur action.

Les appareils précédents ne conviennent qu'à la mesure des tensions produites par des piles ou dynamos capables de

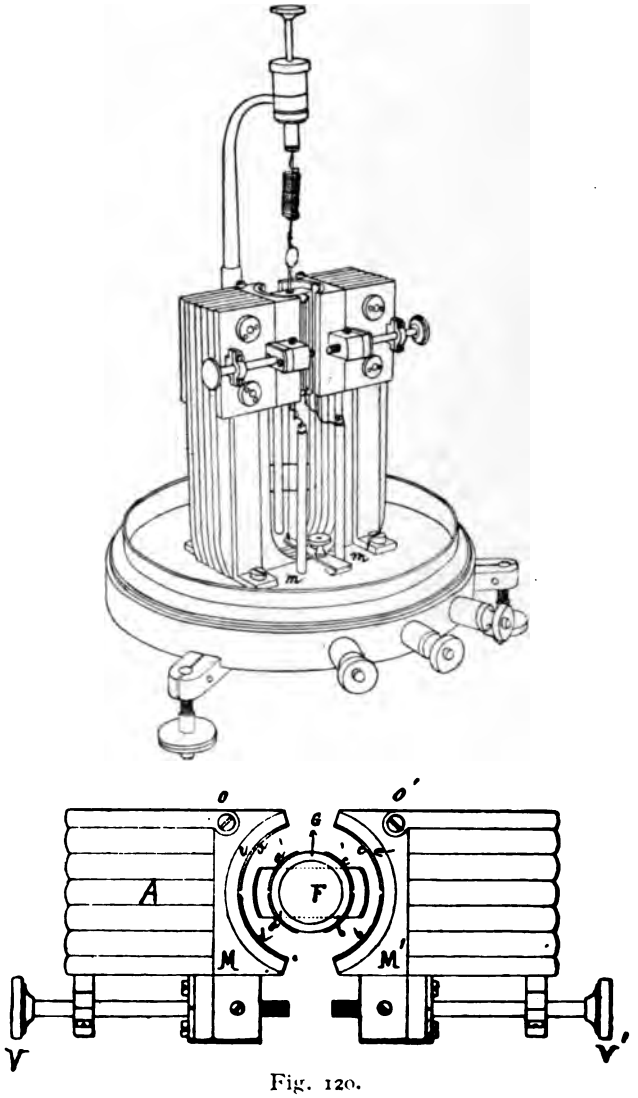


Fig. 120.

restituer constamment l'électricité qui se perd par les supports des pièces métalliques. Pour évaluer les potentiels des charges

statiques, il est nécessaire de prendre des précautions toutes spéciales pour assurer l'isolement de ces pièces.

La fig. 121 montre le modèle d'électromètre de Lord Kelvin, modifié par M. Mascart et dans lequel les précautions requises sont observées. Les quadrants sont découpés dans une boîte de laiton en forme de cylindre aplati. Une palette mobile, pro-

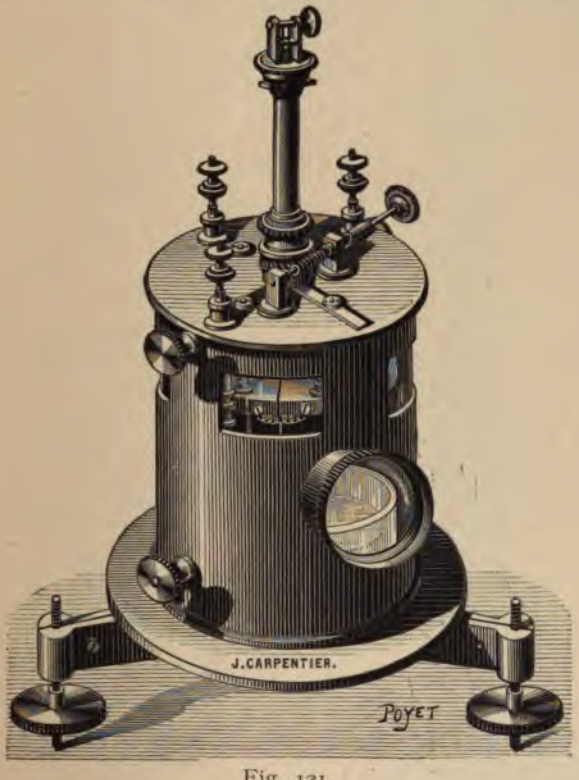


Fig. 121.

filée en 8 à lobes évidés, est suspendue à l'intérieur de cette boîte; elle est supportée par un bifilaire en soie et se termine sous les quadrants par un fil de platine auquel sont attachés le miroir destiné aux lectures et un croisillon plongeant dans une coupe pleine d'acide sulfurique. Outre son action desséchante, ce liquide amortit les mouvements de l'équipage et permet de mettre celui-ci en communication électrique avec l'extérieur.

En adoptant, dans un électromètre de forme analogue, une palette en papier mince argenté, soutenue par un fil de quartz et chargée à un potentiel de 110 volts, M. Dolezalek a pu obtenir, pour 0,1 volt entre les paires de quadrants, une déviation de 65 mm sur une échelle placée à 1 m.

Électromètre capillaire de M. Lippmann. — Un tube en verre T, contenant du mercure, est disposé verticalement et se termine par une pointe capillaire dans une éprouvette remplie d'eau acidulée de 1/6e d'acide sulfurique, fig. 122. Quand une couche de mercure déposée au fond de l'éprouvette est mise en communication par une électrode P avec le pôle positif d'un élément de pile Daniell, tandis que le mercure du tube est relié au pôle négatif de cet élément par une électrode S, on constate un relèvement du niveau du mercure dans la pointe capillaire. Cette dénivellation cesse dès que les deux électrodes sont réunies directement entr'elles. Dans les limites de tension qui précèdent la décomposition de l'eau, ce phénomène, observé à l'aide d'un microscope, est susceptible d'accuser des différences de potentiel de l'ordre

Fig. 122.

de 0,0001 volt et, par suite, de servir de base à un électromètre particulièrement utile dans les méthodes de zéro où l'on doit équilibrer des différences de potentiel faibles. Lorsqu'on applique l'appareil à la mesure de forces électromotrices plus grandes, mais nécessairement inférieures à 1 volt, on équilibre la tension superficielle due à la polarisation par une pression exercée sur la colonne de mercure au moyen d'une poire en caoutchouc et estimée à l'aide d'un manomètre à mercure T'. Il faut avoir soin de mettre l'électrode S à un potentiel inférieur à celui de l'électrode P, sinon le ménisque capillaire serait polarisé par l'oxygène et la surface du mercure serait altérée.

Au lieu de déterminer l'abaissement du ménisque à l'aide d'une poire en caoutchouc qui durcit à la longue, il est préférable, comme l'a suggéré M. Limb, de faire communiquer latéralement le tube principal, qui sert alors lui-même de manomètre, avec un réservoir à mercure qu'on élève quand on veut accroître la pression. Les mesures terminées, on descend suffisamment le réservoir pour faire remonter l'eau jusque dans la partie élargie de la pointe, ce qui évite l'altération du mercure dans celle-ci.

Lors du montage de l'instrument il reste de l'air dans la pointe capillaire. On l'expulse par la pression manométrique. Si celle-ci est insuffisante, on casse le bout de la pointe pour faire sortir une gouttelette de mercure.

Chapitre XI.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES.

Généralités. — Les appareils industriels gradués comme ampèremètres ou voltmètres doivent être portatifs et permettre une mise en station rapide, soit à plat sur une table, soit verticalement contre une cloison. Il faut que ces instruments soient à lecture directe, la graduation étant faite en ampères ou en volts. Dans certains cas, on cherche à obtenir des divisions également écartées ; dans d'autres cas, par exemple pour certains voltmètres, il peut être avantageux d'avoir des intervalles plus grands, admettant des lectures plus précises, dans une région déterminée de l'échelle.

Les galvanomètres industriels doivent être très peu influencés par les champs magnétiques parasites. Cette condition est particulièrement importante pour les appareils à placer sur les tableaux de distribution des usines électriques. On diminue l'action des champs extérieurs sur les instruments électromagnétiques en les enfermant dans une boîte de fonte qui sert d'écran et qui est pourvue d'une fenêtre en regard de la graduation.

Il est désirable que les équipages mobiles soient soumis à des couples suffisants pour qu'ils prennent rapidement leur

position d'équilibre. La force antagoniste peut être la pesanteur, si l'appareil est à cadran vertical, ou l'élasticité de ressorts, permettant de placer le cadran dans une position quelconque lorsque l'équipage mobile est parfaitement équilibré relativement à la pesanteur. On utilise habituellement des amortisseurs pour accélérer les lectures. Les divers moyens étudiés à propos des galvanomètres, tels que le frottement contre l'air ou un liquide, ainsi que les courants induits, peuvent être employés. La fig. 123 montre un piston à air appli-

Fig. 123.

qué dans un ampèremètre Siemens et Halske. Les courants de Foucault, occasionnés par des aimants dans une palette mobile entre les pôles de ceux-ci et portée par l'équipage à amortir, constituent un des procédés les plus efficaces. Quand le courant subit une variation périodique, comme c'est le cas lorsque les dynamos sont conduites par des moteurs mal réglés, il importe que la période d'oscillation propre de l'appareil de mesure ne corresponde pas à celle du courant ; sinon les mouvements s'amplifient au point de rendre les lectures impossibles. Comme les fluctuations dues aux moteurs sont généralement rapides, on évite leur répercussion sur les équi-

pages mobiles en donnant à ceux-ci une période d'oscillation propre assez lente.

Il va de soi qu'un galvanomètre industriel doit absorber le moins possible de l'énergie électrique disponible.

Les appareils pour tableaux de distribution, qui doivent être visibles à distance, ont des échelles agrandies, disposées parfois de profil, fig. 124, et éclairées par transparence au moyen de lampes à incandescence, en vue de faciliter les lectures.

Fig. 124.

Les ampèremètres à courant continu sont souvent remplacés par des millivoltmètres, à l'aide desquels on estime la différence de potentiel entre deux points séparés par une résistance étalonnée. Il est nécessaire que celle-ci ait un coefficient de température aussi faible que possible et il doit en être de même de la résistance en série du millivoltmètre, afin de ne pas avoir à se préoccuper des changements de la température ambiante et de l'échauffement par le courant. Pour limiter l'action de ce dernier dans les mesures précises, on dérive parfois sur le shunt une clef de court-circuit, qu'on ouvre au moment des observations.

Dans le but d'accroître la sensibilité, on donne aux volt-

res une bobine en fil de cuivre comportant beaucoup npères-tours et l'on emploie une résistance additionnelle naillechort ou en manganine.

ouvent les voltmètres n'ont à marquer exactement qu'entre limites peu écartées. Ainsi, dans les distributions à 110 volts r l'alimentation de lampes à incandescence, on exige sim- nent que l'instrument soit sensible aux environs de la érence de potentiel normale, où un écart de tension de 0,01 asionne une variation de l'intensité lumineuse de 0,06. On t arriver au résultat en retenant l'équipage mobile par un sort antagoniste ou un poids qui ne se déplace qu'à partir ne certaine intensité du courant traversant l'appareil.

orsqu'on a affaire à des tensions très élevées, l'énergie orbée par les voltmètres est importante à considérer si x-ci doivent rester en circuit, comme c'est le cas sur les leaux de distribution. Il faut alors chercher des instruments si sensibles que possible, fonctionnant avec des courants imes. Les voltmètres électrostatiques sont les plus recom- ndables sous ce rapport, puisqu'avec eux la dépense est le.

Un moyen permettant de soustraire un voltmètre à l'influence variations de la température ambiante consiste à placer en ie avec l'appareil une résistance à coefficient de température le et en dérivation une résistance à coefficient élevé. On t ainsi régulariser le courant de mesure, de manière à intenir la déviation constante pour une tension donnée, elle que soit la température extérieure.

Conditions propres aux appareils pour courants alter- tifs. — On a vu, à propos de l'électrodynamomètre de Bellati, qu'un courant alternatif peut être mesuré par son ion sur une palette de fer doux. On construit sur ce ncipe des instruments à bon marché, mais la forme et la quence du courant ont sur leurs indications une influence i oblige à user de ces appareils avec discernement. Il en est même des appareils à induction, dont il sera question plus n.

Les électrodynamomètres et les instruments basés sur la dil
tation d'un fil parcouru par le courant ne présentent pas c
inconvénient. On peut aussi utiliser un électromètre déri
sur une résistance connue traversée par le courant à mesure

Les voltmètres employés dans les circuits à courants alte
natifs doivent satisfaire aux conditions imposées aux vol
mètres pour courant continu ; en outre, ils ne peuvent avo
qu'une constante de temps minime, afin que le courant y so
en phase avec la différence de potentiel à évaluer. Dans le
appareils à enroulements, on satisfait approximativement
cette exigence en réduisant autant que possible le nombre de
spires et en ajoutant en série une grande résistance non indu
tive. On aura égard, dans le choix des résistances additio
nelles, au phénomène de condensation, dont il a été fait mentic
à l'occasion des bobines de résistance, chap. IV. On a vu qu
existe des modes de fabrication, tels que ceux indiqués p
M. Chaperon et M. Feussner, qui diminuent la capacité, do
le rôle est important avec les courants alternatifs. Il fa
s'efforcer de rendre la réactance du circuit du voltmètre nég
geable.

Pour les usages industriels, on peut néanmoins employ
comme réducteur de tension, au lieu d'une résistance additio
nelle coûteuse, une bobine à self-induction consommant bea
coup moins d'énergie, à condition de graduer l'instrume
muni de son réducteur avec des courants ayant la forme et
fréquence de ceux qu'on veut déterminer.

Dans la pratique courante, on remplace fréquemment, av
les courants alternatifs, les résistances additionnelles d
voltmètres et les shunts des ampèremètres par le primaire
petits transformateurs statiques, au secondaire desquels
raccorde l'instrument de mesure. Un même appareil peut ai
servir de voltmètre ou d'ampèremètre, en utilisant des tra
formateurs à rapports de réduction convenables.

Ces transformateurs sont ordinairement du type à circ
magnétique simple, avec noyau en tôles très minces pour évi
les courants de Foucault. Ils sont placés derrière les table
de distribution, de manière à être inoffensifs quand leur

maire est alimenté par un circuit à haute tension. Pour la mesure de courants très intenses, le noyau entoure une simple barre intercalée dans le circuit et porte une bobine reliée à l'ampèremètre. On proportionne les transformateurs de mesure de façon que leur consommation d'énergie soit faible.

Rappelons qu'entre les différences de potentiel efficaces, les courants efficaces et les nombres de spires primaires et secondaires on a, en négligeant les chutes de tension, l'hystérésis et les dispersions de flux,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

et que les tensions V_1 et V_2 sont sensiblement proportionnelles à la fréquence.

Eu égard aux différences de forme et de fréquence des courants alternatifs, il est à conseiller de graduer, dans chaque cas, le voltmètre ou l'ampèremètre avec son transformateur, en se servant d'un appareil étalon. On évite les effets d'hystérésis en utilisant des transformateurs sans fer, mais ceux-ci sont plus coûteux.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer des courants redressés, il faut recourir à des instruments du genre de l'électrodynamomètre ou à des appareils thermiques, dont les indications sont indépendantes de la forme des courants.

Ampèremètres à cadre mobile. Système Weston Système Chauvin et Arnoux. — M. Weston a rendu le galvanomètre Deprez et d'Arsonval portatif en supportant la bobine mobile entre deux pointes pivotant sur des chapes en agate et en employant deux ressorts spiraux en bronze phosphoreux pour diriger le cadre et donner accès au courant, fig. 125 et 126. Il faut naturellement proscrire les ressorts en métal magnétique. La bobine, qui ne comporte qu'une seule couche de fil, est enroulée sur une carcasse d'aluminium, qui assure l'amortissement des oscillations. L'épaisseur de l'entrefer ne dépasse pas 0,9 mm. Un index effilé en aluminium, fixé au cadre, pointe les indications sur un cadran gradué, dans le plan duquel se trouve une glace qui permet d'éviter l'erreur

de parallaxe. Grâce aux pièces polaires étendues, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux courants dans un angle

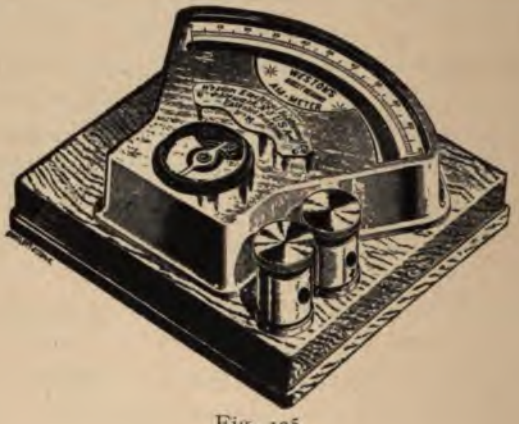


Fig. 125

d'environ 70°. Pour la mesure des courants intenses, l'appareil

Fig. 126.

contient un shunt relié aux bornes extérieures. L'instrument

doit être vérifié de temps en temps à cause de l'affaiblissement progressif, d'ailleurs très faible, de l'aimant.

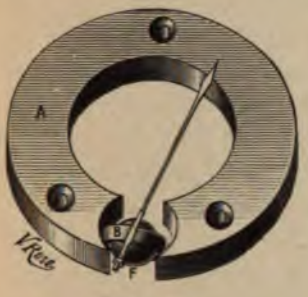


Fig. 127.

Fig. 128.

M. Weston construit sur le même principe des millivoltmètres, qui, combinés avec des shunts constitués par des

Fig. 129.

étalons de 0,1, 0,01 ou 0,001 d'ohm, donnent le moyen de mesurer des courants très variés.

MM. Chauvin et Arnoux ont simplifié la construction des galvanomètres de ce genre. L'aimant, de forme circulaire, est alésé de manière à supprimer les pièces polaires rapportées, fig. 127. C'est un morceau d'acier au tungstène trempé dur et recuit légèrement avant l'aimantation pour augmenter sa force coercitive. Le flux magnétique de l'aimant est condensé à l'aide d'une sphère en acier fabriquée comme les billes pour coussinets. La bobine est une couronne de fil de cuivre, sertie entre deux bagues en cuivre découpées dans un tube et servant d'amortisseur, fig. 128. L'équipage mobile, monté entre pointes d'acier pivotant sur des chapes en pierre fine, est dirigé par deux ressorts spiraux. La fig. 129 montre un appareil semblable, dérivé sur une résistance faible en vue de la mesure de courants intenses.

Une élévation de température diminue le couple directeur de torsion des appareils à bobine mobile, mais elle affaiblit en même temps le magnétisme des aimants, ce qui établit une certaine compensation.

Ampèremètres à bobine fixe. Systèmes Deprez et Carpentier, Hummel, Dobrowolski, Evershed. — Dans certains galvanomètres industriels une pièce de fer doux est sollicitée par un cadre fixe, de manière à s'orienter dans la direction des lignes de force magnétique dues au courant ou à se déplacer vers la région du champ dont l'intensité est la plus grande. La force antagoniste qui s'oppose à l'action du courant est l'attraction d'un aimant directeur, le poids de l'équipage mobile ou l'élasticité d'un ressort.

Les appareils de l'espèce sont influençables par les champs magnétiques extérieurs, tels que ceux développés par des conducteurs voisins où circulent des courants intenses dont les flux ne sont pas négligeables devant ceux des instruments eux-mêmes. Il faut veiller à ce que les lignes de force produites par la bobine agissant sur la pièce mobile soient autant que possible normales à celles de l'aimant directeur, afin de ne pas changer sensiblement l'aimantation de ce dernier.

L'attraction d'un aimant directeur est mise à profit dans le

galvanomètre Deprez et Carpentier, fig. 130 et 131, qui comprend une bobine B à l'intérieur de laquelle une palette de fer doux, pivotant entre deux pointes, est orientée par un double aimant recourbé FF. Le courant traversant la bobine tend à faire tourner la palette, qui, sous l'influence des deux couples contraires, prend une position d'équilibre marquée par un index. Grâce à la puissance de l'aimant, les mouvements de l'aiguille sont rapides et l'effet des aimants et courants voisins est peu sensible, mais la période propre du système mobile se

Fig. 130.

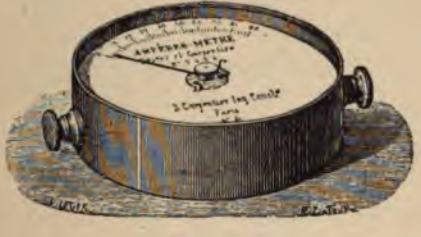


Fig. 131.

rapproche souvent de celle des machines à pistons conduisant les dynamos, ce qui tend à amplifier les oscillations de l'index.

Dans l'appareil de M. Hummel, fig. 132, une lame courbe en fer doux E pivote autour d'un axe et entraîne dans son mouvement un index Z dont l'extrémité se déplace devant une graduation. L'équipage mobile est en équilibre sous l'action de la pesanteur quand l'index pointe le zéro. Un petit écrou vissé sur Z et faisant office de contrepoids permet de ramener l'index à l'origine de l'échelle lorsqu'on met l'instrument en place.

Quand on envoie le courant à mesurer dans le conducteur LL, la lame est sollicitée à s'approcher de celui-ci en vertu de la tendance qui pousse les corps magnétiques à se mouvoir dans

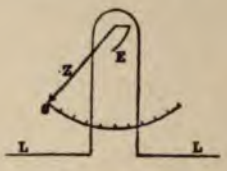


Fig. 132.

un champ vers les parties où l'intensité est maxima. Il s'ensuit que l'index est dévié d'un angle correspondant à l'égalité entre le couple électromagnétique et le couple de la pesanteur. Avec un courant intense une seule boucle de fil conducteur suffit pour obtenir le champ magnétique nécessaire au déplacement de la lame. Si le courant est faible, on utilise un enroulement à nombreuses spires de fil fin.

Le système Dobrowolski comporte une tige de fer doux, équilibrée par un contrepoids et qui tend à descendre dans une bobine sous l'action du courant traversant celle-ci, fig. 133. Un index fixé à l'axe de rotation mesure la déviation.

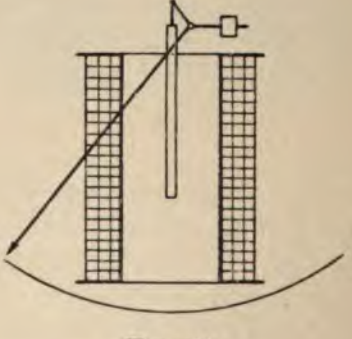


Fig. 133.

Dans quelques ampèremètres, l'action électromagnétique de la bobine est modifiée par la présence de pièces en fer fixes, aimantées par le courant et réagissant sur la pièce de fer mobile.

Si les premières s'aimantent dans le même sens que la dernière, elles attirent celle-ci. C'est ainsi que, dans l'ampèremètre Evershed, fig. 134, deux pièces de fer doux p et p', fixées à l'intérieur de la bobine magnétisante, agissent sur une barrette de même métal b attachée latéralement à l'axe de l'aiguille indicatrice. En déplaçant p et p', on peut varier la sensibilité de l'instrument. D'autres fois les pièces de fer fixes sont disposées à l'extérieur de la bobine pour renforcer l'action électromagnétique du courant sur l'équipage mobile.

Dans les appareils à pièces de fer doux mobiles et sans aimants permanents, le couple dévient dépend du carré de l'intensité du courant, lorsque l'aimantation du fer est faible.

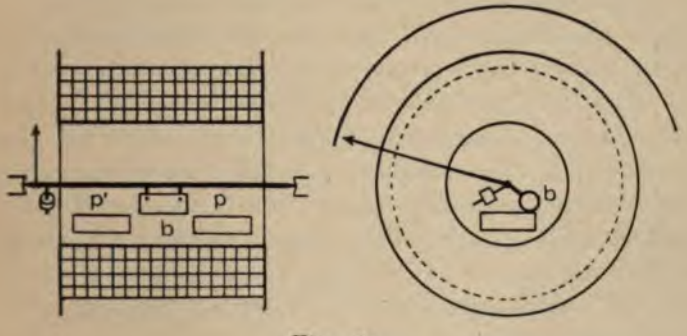


Fig. 134.

Dans ces conditions, l'action électromagnétique est petite et il faut réduire autant que possible les frottements des pivots. Par suite de l'hystérésis, qui est surtout sensible dans les dispositifs à pièces de fer auxiliaires, un même courant peut donner lieu à des inductions magnétiques différentes. C'est pourquoi l'on doit faire passer le courant toujours dans le même sens à travers la bobine, afin d'éviter les renversements de magnétisme du fer doux et les aimantations rémanentes opposées qui en résultent. On marque d'une croix la borne de l'appareil qui doit être reliée au pôle positif de la source d'électricité.

Les instruments à fer doux dépourvus d'aimants permanents peuvent être utilisés avec les courants alternatifs, à la condition

Si, par exemple, $x = f/1000$ et $l = f = 10$ cm, il vient $F' = 1{,}78$ cm.

L'appareil est gradué empiriquement. La plaque rigide qui soutient le fil f est constituée par la juxtaposition de pièces de laiton et de fer dont l'ensemble présente le même coefficient de dilatation que le platine-argent. De la sorte les variations de la température ambiante n'exercent pas d'influence perturbatrice. Une vis de rappel sert à tendre le fil dilatable pour amener l'index initialement au zéro. La fig. 137 montre l'aspect

Fig. 137.

extérieur d'un ampèremètre. Le système mobile est pourvu d'un disque en aluminium, qui tourne entre les pôles d'un aimant recourbé et assure ainsi l'amortissement des oscillations.

Si le fil actif est laissé en circuit d'une manière permanente, la chaleur rayonnée peut dilater son support. M. Gaiffe a évité cet inconvénient en employant pour ce dernier du métal invar, mais alors les modifications de la température ambiante n'ont plus une action négligeable.

Les appareils à dilatation sont à l'abri des influences électromagnétiques extérieures. Ils conviennent donc tout spécialement pour les tableaux de distribution, où une grande précision n'est pas nécessaire.

Si les résistances additionnelles ajoutées au fil dilatable des voltmètres thermiques sont de l'ordre de la résistance de ce fil, elles doivent être en même substance que celui-ci et placées dans des conditions semblables. Mais, si elles sont beaucoup plus grandes que la résistance du fil, on peut, comme avec les autres voltmètres, les composer d'un alliage dont le coefficient de température est négligeable.

Appareils électrodynamiques. Modèle Siemens. Modèle Weston. — Les électrodynamomètres sont les appareils les plus précis pour la mesure industrielle des courants alternatifs.

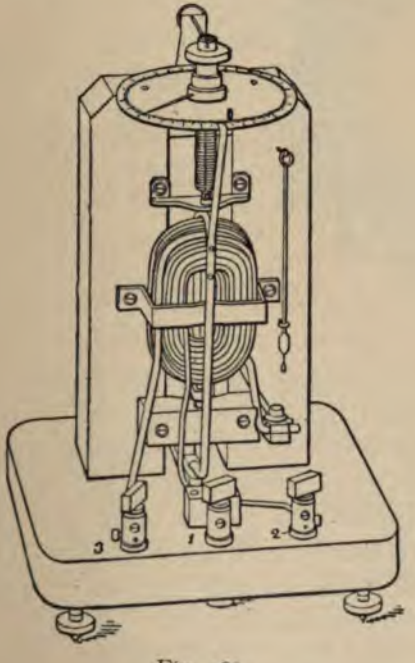


Fig. 138.

Il est essentiel qu'il n'y ait dans leur voisinage aucune masse

les poulies P_1 et P_2 doivent avoir le même coefficient de dilatation que le fil d'alliage. Un fil de sûreté très fin est destiné à fondre avant le fil dilatable, qui ne peut pas supporter plus de 0,4 ampère. Les conditions de refroidissement n'étant pas les mêmes quand l'appareil est disposé horizontalement que lorsque sa position est verticale, il faut avoir soin, pour la graduation, de placer l'instrument comme dans ses applications.

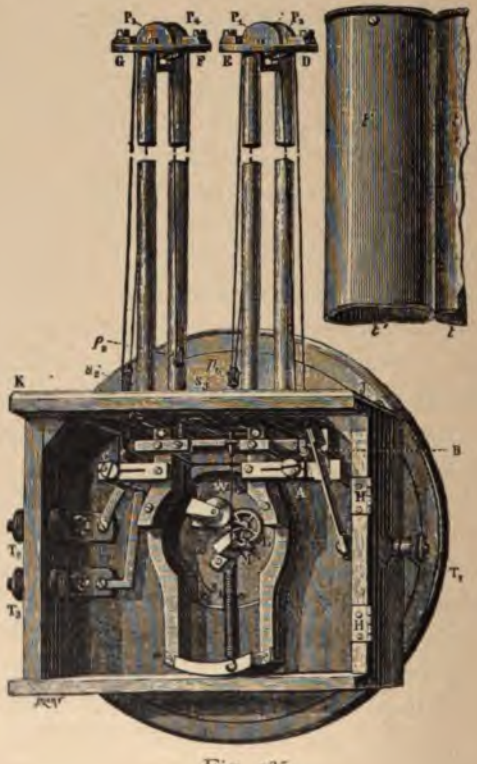


Fig. 135.

MM. Hartmann et Braun ont réduit la longueur du conducteur dilatable en recourant à un système d'amplification des indications, fig. 136. Le fil de platine-argent *f* est dérivé sur un shunt dans les ampèremètres et mis en série avec une résistance additionnelle dans les voltmètres. A ce fil est fixé un fil de laiton

l, au milieu duquel vient s'attacher un fil de soie *s* passant autour d'une petite poulie et tendu par un ressort *r*. Lorsqu'il est échauffé par le courant, qui ne doit pas dépasser 0,2 ampère, le fil *f* s'allonge et s'infléchit, ainsi que le fil *l*, sous la tension du ressort *r*, tandis qu'un index porté par l'axe de la poulie accuse une déviation.

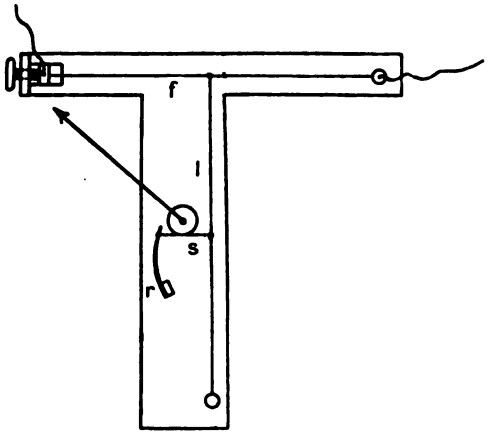


Fig. 136.

Si le fil *f* acquiert une longueur $f + x$, sa flèche F satisfait à la relation

$$F^2 = \left(\frac{f+x}{2}\right)^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2,$$

d'où l'on tire, en négligeant le carré de $x/2$ devant fx,

$$F = \sqrt{fx}.$$

Le fil *l* conserve sa longueur, mais son milieu se déplace d'une quantité F', telle que

$$F'^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 - \left(\frac{l-F}{2}\right)^2.$$

Par suite, si l'on omet $F^2/4$ devant Fl,

$$F' = \sqrt{Fl} = \sqrt{l}\sqrt{fx}.$$

Si, par exemple, $x = f/1000$ et $l = f = 10$ cm, il vient $F' = 1{,}78$ cm.

L'appareil est gradué empiriquement. La plaque rigide qui soutient le fil f est constituée par la juxtaposition de pièces de laiton et de fer dont l'ensemble présente le même coefficient de dilatation que le platine-argent. De la sorte les variations de la température ambiante n'exercent pas d'influence perturbatrice. Une vis de rappel sert à tendre le fil dilatable pour amener l'index initialement au zéro. La fig. 137 montre l'aspect

Fig. 137.

extérieur d'un ampèremètre. Le système mobile est pourvu d'un disque en aluminium, qui tourne entre les pôles d'un aimant recourbé et assure ainsi l'amortissement des oscillations.

Si le fil actif est laissé en circuit d'une manière permanente, la chaleur rayonnée peut dilater son support. M. Gaiffe a évité cet inconvénient en employant pour ce dernier du métal invar, mais alors les modifications de la température ambiante n'ont plus une action négligeable.

Les appareils à dilatation sont à l'abri des influences électromagnétiques extérieures. Ils conviennent donc tout spécialement pour les tableaux de distribution, où une grande précision n'est pas nécessaire.

Si les résistances additionnelles ajoutées au fil dilatable des voltmètres thermiques sont de l'ordre de la résistance de ce fil, elles doivent être en même substance que celui-ci et placées dans des conditions semblables. Mais, si elles sont beaucoup plus grandes que la résistance du fil, on peut, comme avec les autres voltmètres, les composer d'un alliage dont le coefficient de température est négligeable.

Appareils électrodynamiques. Modèle Siemens. Modèle Weston. — Les électrodynamomètres sont les appareils les plus précis pour la mesure industrielle des courants alternatifs.

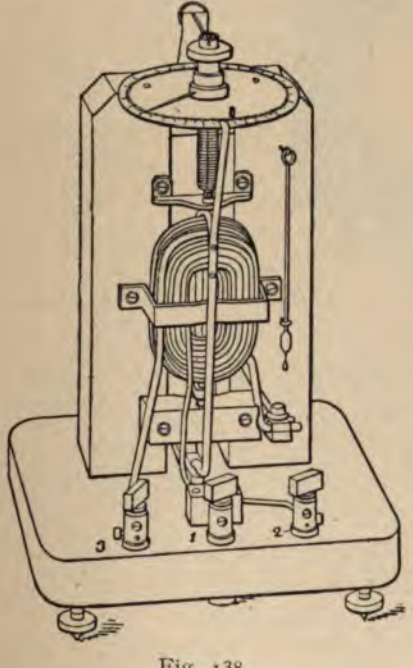


Fig. 138.

Il est essentiel qu'il n'y ait dans leur voisinage aucune masse

métallique susceptible de devenir, par induction, le siège de courants de Foucault de nature à influencer les indications.

Pour évaluer des courants intenses, M. Siemens a donné à l'électrodynamomètre la forme représentée dans la fig. 138. La bobine mobile, placée à l'extérieur de la bobine fixe, est réduite à une seule spire suspendue par un fil de cocon et orientée par un ressort à boudin fixé à une tête de torsion. Le courant accède à la spire par des godets à mercure superposés suivant l'axe de rotation. Un fil à plomb sert à disposer l'ins-

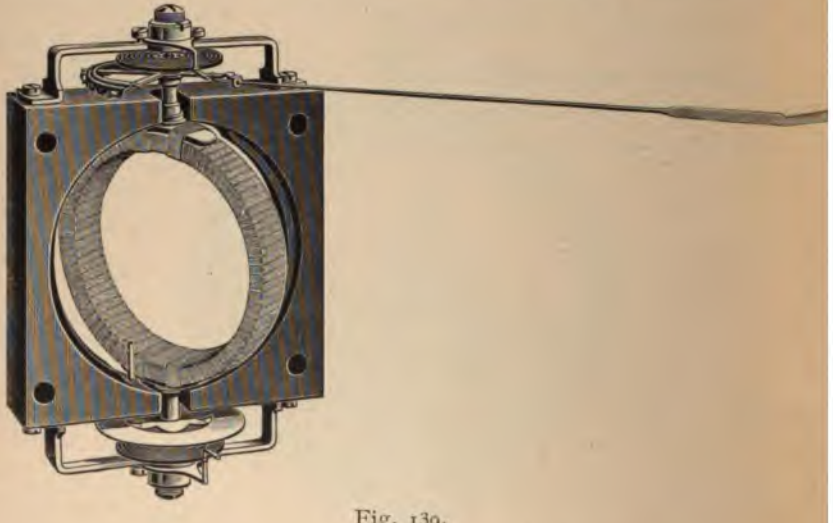


Fig. 139.

trument de niveau. La tête de torsion permet de maintenir le cadre mobile dans la position repérée par un index attaché à celui-ci. L'influence du champ terrestre est nulle si le plan du cadre est normal au méridien magnétique. Elle est, en tous cas, très faible, puisqu'il n'y a qu'une seule spire. Le socle et le montant qui sert de support à la bobine fixe sont en bois ou en ébonite, pour éviter les courants parasites dans le cas d'utilisation avec des courants alternatifs.

La formule d'emploi de l'instrument est

$$I = \frac{1}{k}\sqrt{\theta},$$

où I se rapporte à l'intensité efficace quand il s'agit de courants périodiques.

La fig. 139 montre un modèle d'électrodynamomètre conçu par M. Weston pour servir de voltmètre avec les courants alternatifs. Le mode de fixation et de direction de la bobine mobile est le même que dans l'ampèremètre pour courant continu de ce constructeur. L'arrêt des oscillations du cadre mobile est provoqué par une pièce frottant sur un disque fixé à l'axe de rotation. On détermine ce frottement amortisseur en poussant sur un bouton.

De même que les ampèremètres, les voltmètres électrodynamiques ou thermiques pour courants alternatifs de haute tension sont ordinairement reliés par l'intermédiaire de petits transformateurs statiques à circuit magnétique fermé, qui abaissent la différence de potentiel à une valeur compatible avec les appareils de mesure. Si l'on gradue l'échelle de 0 à 150, 100 représentant la tension normale, on lit directement les valeurs en pour cent par rapport à celle-ci.

Appareils à induction électromagnétique. — On a basé sur l'induction électromagnétique une série d'appareils propres aux courants alternatifs, dont la caractéristique est une grande simplicité. Les électrodynamomètres Fleming et Bellati sont des exemples de cette application.

La maison Siemens et Halske construit des instruments utilisant les propriétés inductives des champs tournants. Cette collection comporte des ampèremètres, voltmètres, ohmmètres, wattmètres et compteurs. Les appareils, fig. 140, consistent essentiellement en un anneau de fer feuilleté muni de quatre projections radiales, dont deux reçoivent des bobines traversées par le courant inducteur, tandis que les deux autres, situées dans une direction perpendiculaire, sont pourvues d'enroulements en court-circuit s'il s'agit d'un ampèremètre ou d'un voltmètre. Dans le premier cas, les premières bobines peuvent être à fil fin quand on a recours à un transformateur auxiliaire. Dans le second cas, elles sont mises en série avec une bobine à réaction en vue de réduire le courant. A l'intérieur du système

se trouve un noyau fixe en fer, entouré d'un tambour mobile en aluminium. L'axe du tambour porte une aiguille qui se déplace devant un cadran divisé. Au couple de rotation produit par le flux tournant qui agit sur le tambour est opposé le couple de torsion de deux ressorts spiraux, enroulés en sens inverses pour éviter l'influence de la température. Des aimants embrassant un disque métallique amortissent les oscillations du tambour. Ces instruments n'exigent qu'une dépense minime

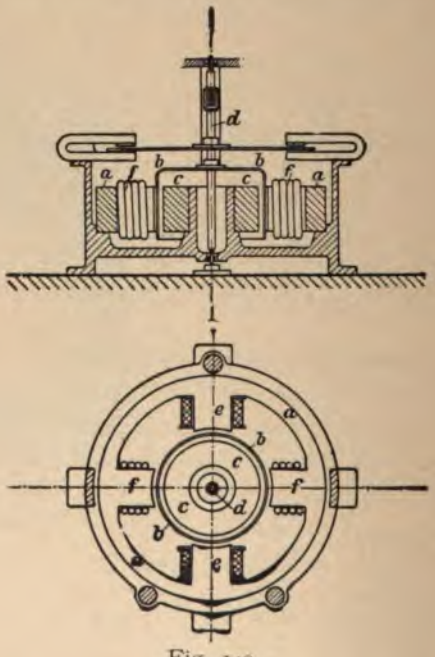


Fig. 140.

d'énergie. Ils sont peu sensibles aux changements de fréquence. Enfin, ils ne sont pratiquement pas influencés par les champs voisins.

La Société d'électricité A. E. G. applique le principe de la répulsion par les courants alternatifs en enroulant, fig. 141, une bobine B autour d'un noyau magnétique feuilleté en forme de fer à cheval, dont les épanouissements polaires N entourent dissymétriquement un disque d'aluminium D engagé dans un

écran conducteur P. Le disque est sollicité par un couple moteur équilibré à l'aide d'un ressort antagoniste. Une aiguille indique le courant ou la tension à mesurer sur un cadran.

Les appareils à induction sont gradués empiriquement avec des courants de la forme et de la fréquence de ceux à évaluer.

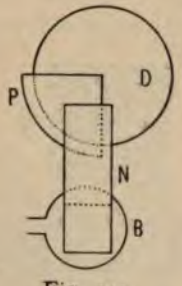


Fig. 141.

Voltmètres électrostatiques. Modèles de Lord Kelvin, de MM. Ayrton et Mather et de M. Jona. — Pour mesurer les différences de potentiel élevées fournies par les machines électriques et particulièrement par les alternateurs, on adopte parfois des électromètres à lecture directe et gradués en volts, qu'on désigne sous le nom de voltmètres électrostatiques. Dans ces appareils, qui sont toujours basés sur l'emploi de la formule (3), page 243, on supprime l'une des paires de quadrants.

Lord Kelvin a combiné, pour l'évaluation des tensions de 40 à 800 volts, un instrument, appelé voltmètre multicellulaire, qui comporte une série de quadrants doubles, superposés et agissant sur des palettes mobiles, en forme de 8, suspendues à un fil métallique mince, fig. 142. Un index en aluminium, se déplaçant devant une graduation, sert aux observations. L'amortissement est assuré par un disque qui porte librement sur un anneau et baigne dans un liquide.

Dans le voltmètre électrostatique de MM. Ayrton et Mather, deux couples de segments cylindriques fixes en laiton attirent deux palettes en aluminium, également en forme de segments de cylindre, qui pivotent autour d'un axe vertical auquel est attaché l'index. Un ressort spiral en métal non magnétique est

utilisé comme force directrice. Les segments fixes sont reliés à l'une des bornes de l'appareil, les segments mobiles à l'autre. Des fils de sûreté en platine-argent, de 0,02 mm de diamètre et tendus par de petits ressorts dans des tubes en verre, sont insérés dans les conducteurs de liaison. Les bornes sont recouvertes de manchons en ébonite pour prévenir les accidents. En vue de préserver l'instrument contre les tensions exces-

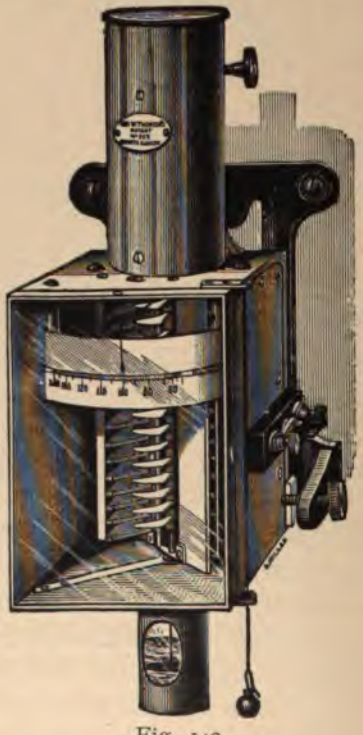


Fig. 142.

sives, un intervalle d'air restreint sépare les connexions aboutissant aux deux catégories de segments, de manière à favoriser éventuellement la production d'une étincelle et la fusion des coupe-circuits.

Des précautions de ce genre doivent toujours être prises avec les voltmètres à haute tension.

MM. Ayrton et Mather ont remarqué que le verre du cou-

vercle des voltmètres acquiert parfois, à la suite d'un frottement, une électrisation capable de fausser les indications. Pour se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, ils enduisent le verre

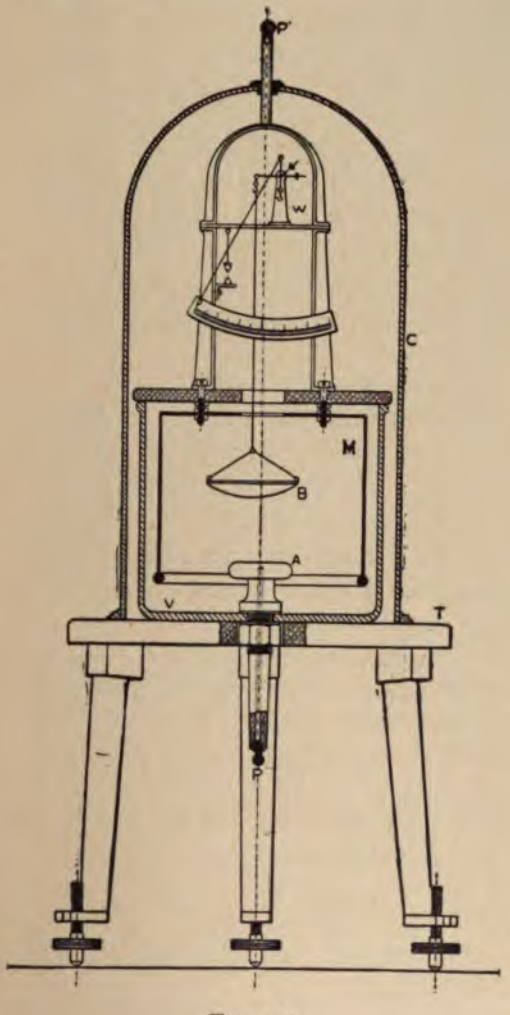


Fig. 143.

d'une couche de gélatine rendue conductrice par de l'acide sulfurique. Il suffit, du reste, de couvrir le verre de vapeur

d'eau par expiration après son nettoyage, pour éviter cet effet perturbateur.

Lorsqu'il s'agit de mesurer des différences de potentiel de 50 000 volts et au delà, on a recours à des dispositifs analogues à la balance électrostatique, chap. X. Le voltmètre Jona, fig. 143, se compose d'un disque fixe A et d'un plateau mobile équilibré B plongés dans l'huile contenue dans un récipient V. L'enveloppe métallique M, reliée au plateau B, soustrait celui-ci aux influences extérieures. L'instrument est placé sur une plaque en ébonite T portée par des pieds de même substance. Les lectures se font à l'aide d'une longue aiguille en ébonite. Une cloche en verre C enferme l'ensemble.

Les voltmètres électrostatiques, mettant en jeu des forces minimes, doivent avoir des chapes et des pivots très délicats et aussi durs que possible.

Mesure des courants de grande fréquence et faible intensité. — On a vu que l'électrodynamomètre de M. Fleming se prête à la mesure des courants téléphoniques.

Lorsqu'il s'agit de fréquences très élevées, telles que celles utilisées pour la télégraphie sans fil et dans certains traitements médicaux, les appareils à bobines présentent trop de self-induction.

On pourrait songer à déterminer avec un électromètre la différence de potentiel aux extrémités d'un conducteur droit parcouru par le courant inconnu, mais une grande partie de celui-ci serait dérivée vers l'instrument jouant le rôle de condensateur.

Les procédés qui donnent les meilleurs résultats sont basés sur l'évaluation de la chaleur dégagée par le courant dans un fil mince.

MM. Hartmann et Braun construisent, sur le principe des ampèremètres thermiques, des appareils à fil très fin dont la dilatation est estimée, non par le déplacement d'un index, mais par la rotation d'un miroir, ce qui procure beaucoup plus de sensibilité.

On peut apprécier l'échauffement d'un fil ténu de platine, de

charbon ou de tantale, disposé de préférence dans le vide à la façon des filaments des lampes à incandescence et traversé par un courant de haute fréquence, en mesurant la variation de sa résistance électrique. C'est là le principe des *bolomètres*. Un moyen pratique consiste à comparer, par la méthode du pont de Wheatstone, la résistance du fil avec celle d'un fil identique placé dans les mêmes conditions de température ambiante. Un courant continu sert à la comparaison. Le courant alternatif est sans action sur le galvanomètre du pont.

Enfin, le dispositif qui procure la plus grande sensibilité est le thermo-galvanomètre de M. Dudell, auquel on peut recourir chaque fois qu'il y a lieu d'évaluer un rayonnement calorifique minime. Cet appareil, du type Deprez et d'Arsonval, possède une bobine à boucle unique, fermée à la partie inférieure sur un couple bismuth-antimoine suspendu à la spire. Le fil dans lequel passe le courant de haute fréquence est mis au-dessous du couple et la chaleur qu'il rayonne provoque la production par celui-ci d'un courant qui fait dévier le cadre d'un angle lu par réflexion. On arrive ainsi à obtenir un déplacement de 250 mm sur une échelle à 1 m avec un courant efficace de 110 micro-ampères. L'instrument est gradué à l'aide d'un courant continu.

Remarquons que l'on peut déterminer la différence de potentiel due à un courant de haute fréquence en mesurant ce dernier dans une résistance connue sans self-induction ni capacité, du genre de celles décrites au chap. IV.

Étalonnage des ampèremètres et voltmètres. Courbe des erreurs. — *Cas des courants continus*. L'étalonnage des ampèremètres exige des courants réguliers dont l'intensité doit atteindre parfois plusieurs milliers d'ampères. Celui des voltmètres nécessite souvent des générateurs à haute tension. C'est ordinairement aux accumulateurs ou aux transformateurs rotatifs qu'on a recours pour obtenir les conditions requises.

Quand il s'agit d'ampèremètres, on emploie de grands éléments secondaires ou des batteries groupées en parallèle. Il est nécessaire de disposer assez de couples en série pour arriver à 8 ou 10 volts, car on doit mettre en tension avec la source

électrique l'ampèremètre à graduer, l'appareil étalon, le rhéostat de réglage, des fils de connexion et leurs jonctions, ce qui, avec des courants intenses, conduit à une différence de potentiel totale notablement supérieure à la chute de tension occasionnée par l'instrument essayé. On peut aussi attaquer, par un moteur raccordé à la distribution électrique du laboratoire, une dynamo donnant les courants requis sous une tension voisine d'une dizaine de volts.

Les rhéostats pour forts courants sont généralement des barres de manganine ou de constantan, réunies en parallèle par des godets à mercure ou des interrupteurs solides. On utilise aussi des tubes à circulation intérieure d'eau, qui tolèrent le passage de courants très intenses.

Pour les voltmètres, on peut faire usage de dynamos à courant faible, lorsque les tensions d'expérience ne dépassent pas 1 000 à 1 500 volts. Au delà, on préfère recourir à de petits éléments secondaires à 2 ou 3 plaques, mis en série en grand nombre. On réalise ainsi, dans certains laboratoires, des tensions d'essai atteignant 10 000 volts. On éprouve la batterie par sections, ce qui permet de calculer la tension totale des groupes reliés en série, si l'on a soin d'isoler convenablement les éléments. Ceux-ci sont montés dans des vases en verre posés sur des étagères en verre portées par des isolateurs dans des armoires métalliques. On verra ci-après le moyen d'arriver à des tensions plus élevées.

Les appareils étalons servant à la comparaison sont souvent des galvanomètres à cadre mobile, jaugés eux-mêmes à l'aide d'un potentiomètre. Ce dernier peut être employé directement pour plus d'exactitude. On sait qu'il se prête à l'évaluation des tensions entre des limites qui ne dépendent que des résistances disponibles. Pour la mesure des intensités, on passe par l'intermédiaire de résistances étalons de 1, 0,1, 0,01, 0,001 ou 0,0001 ohm, dans lesquelles on envoie les courants à estimer et aux bornes desquelles on relève la différence de potentiel.

Pendant l'étalonnage, il est nécessaire de laisser les appareils en circuit assez longtemps pour qu'ils prennent leur température de régime, lorsque, comme c'est le cas des instruments

destinés aux tableaux de distribution, ils doivent rester continuellement en service.

Il faut faire passer dans les appareils comparés des courants croissant jusqu'à l'intensité maxima, puis décroissant progressivement. On dresse la *courbe des erreurs,* c'est-à-dire le diagramme dont les abscisses représentent, suivant les circonstances, les intensités de courant ou les différences de potentiel vraies, tandis que les ordonnées figurent les écarts entre les indications des deux instruments.

Si l'on étudie un instrument nouveau, il est important de rechercher la région de l'échelle où l'erreur relative est minima et de l'utiliser pour le régime normal.

Avec les appareils rigoureusement proportionnels, la courbe des erreurs a des ordonnées graduellement croissantes. Mais, pour la plupart des instruments industriels, la courbe de la déviation en fonction du courant est complexe et le diagramme des erreurs présente un ou plusieurs minima.

Les frottements du système mobile s'estiment en recherchant de combien on peut modifier le courant en plus ou en moins sans altérer visiblement l'indication de l'instrument essayé.

Avec les appareils à fer doux mobile, dont l'emploi tend d'ailleurs à se restreindre, il est important de vérifier les effets de l'hystérésis, qui s'accusent par une différence entre les erreurs constatées dans la période croissante et la période décroissante du courant. A ce point de vue, il est nécessaire de refaire les expériences après renversement du sens du courant. On peut contrôler rapidement l'influence de l'hystérésis en observant les écarts qui correspondent au courant maximum passant successivement dans les deux sens.

Les voltmètres électrostatiques pour tensions élevées peuvent être gradués à l'aide de petits éléments primaires ou secondaires essayés par groupes et mis ensuite en série de manière à réaliser les différences de potentiel voulues. On peut amplifier la tension en chargeant au moyen de la pile des condensateurs très bien isolés et en réunissant ceux-ci en cascade de façon à cumuler les différences de potentiel des armatures. Inversement, pour mesurer des tensions très élevées avec un électro-

mètre dont la marge n'est pas suffisante, il est possible de charger des condensateurs en cascade et de relier l'appareil à l'un d'eux. (1)

L'emploi des voltmètres électrostatiques entraîne ordinairement une correction pour la force électromotrice de contact, qui vaut 0,5 volt quand l'équipage mobile est en aluminium et les quadrants en cuivre.

Cas des courants alternatifs. Les ampèremètres pour courants alternatifs sont gradués avec des électrodynamomètres ou des balances électrodynamiques, dont les indications sont indépendantes de la forme et de la fréquence des courants.

Il est désirable de faire l'étalonnage en munissant les appareils à contrôler des shunts, résistances additionnelles, bobines à réaction ou transformateurs qui leur servent d'auxiliaires et en utilisant des courants d'essai ayant la forme et la fréquence des courants de service.

Aux courbes d'erreurs dressées avec des courants efficaces croissants et décroissants, il est utile d'ajouter le diagramme des erreurs observées avec le courant efficace maximum en modifiant la fréquence. A cet effet, on emploie des générateurs à fréquence variable, chap. V, actionnés par des électromoteurs reliés à des accumulateurs.

Lorsque les instruments étalons ou les courants dont on dispose ne permettent pas d'atteindre le régime normal des appareils à transformateurs réducteurs expérimentés, on gradue ces appareils sans leurs transformateurs et l'on détermine séparément le rapport de réduction de ceux-ci pour un régime compatible avec les ressources du laboratoire.

Pour vérifier les voltmètres à haute tension, il est commode de recourir à un électromètre étalonné, au préalable, avec des tensions continues, comme on l'a vu plus haut.

Ajoutons que les ampèremètres et voltmètres ne sont homologués par la Reichsanstalt de Berlin que si les erreurs relevées ne dépassent pas ± 0,2 d'un intervalle de l'échelle ou ± 0,01

(1) *Bull. de l'Ass. des ing. électr. sortis de l'Institut Montefiore.* 1891.

de la valeur réelle. De ces deux conditions on applique toujours la moins rigoureuse. Pour les instruments de mesure à échelle réduite, l'erreur ne peut jamais excéder ± 0,01 de la valeur vraie. Il en est de même pour ceux dont l'emploi est limité à une partie de l'échelle par une inscription, telle que : ampèremètre exact de ... à ... ampères.

En ce qui concerne les appareils devant marquer de charge nulle à pleine charge, il est bon, dans un essai d'homologation, de vérifier la constante, chaque fois pendant une heure, à 1/5, 3/5 et 5/5 de la charge normale, puis de nouveau à 5/5, 3/5 et 1/5.

Chapitre XII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

Méthodes indirectes. Méthode de Weber. — Pour la détermination de l'étalon de l'ohm, on a dû évaluer la résistance d'un circuit sans se servir d'une résistance de comparaison. Différentes méthodes ont été employées dans ce but. L'une des plus simples est celle du cadre tournant de Weber. Une bobine circulaire de grand diamètre est disposée de telle manière que le plan de ses spires soit normal au méridien magnétique et peut tourner autour d'un diamètre vertical. Elle est reliée, par l'intermédiaire de deux frotteurs, à un galvanomètre des tangentes situé à une distance suffisante pour que l'aiguille ne soit pas influencée directement par la bobine.

Si l'on fait exécuter au cadre mobile une demi-révolution, il s'y développe, par induction électromagnétique, une quantité d'électricité

$$q = \frac{2\,\mathcal{H}\,s\,n}{R},$$

$\mathcal{H}$ désignant la composante horizontale du champ terrestre, s la surface moyenne d'une spire du cadre, n le nombre de spires et R la résistance totale du circuit. Cette quantité d'élec-

tricité, traversant le galvanomètre, amène une élongation α telle que

$$\frac{2\mathcal{H}sn}{R} = \frac{\mathcal{H}'}{G}\frac{T_0}{\pi}\alpha e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

Si le champ magnétique de la terre est le même aux endroits où se trouvent le galvanomètre et le cadre tournant, ce qu'on peut vérifier en comparant les durées d'oscillation d'une même aiguille aimantée en ces deux points, il vient

$$R = 2snG\frac{\pi}{T_0}\frac{1}{\alpha e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}}.$$

L'exactitude avec laquelle on doit déterminer G, T_0 et α dépend de l'approximation avec laquelle on veut obtenir la valeur de R. En négligeant le facteur d'amortissement et en admettant que les erreurs partielles s'ajoutent, on trouve, pour l'erreur limite,

$$\frac{dR}{R} = \frac{ds}{s} + \frac{dG}{G} + \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthode de MM. Lorenz et Jones. — Le dispositif utilisé est une combinaison du disque de Faraday et du pont de compensation, fig. 144. Un disque conducteur D tourne, à

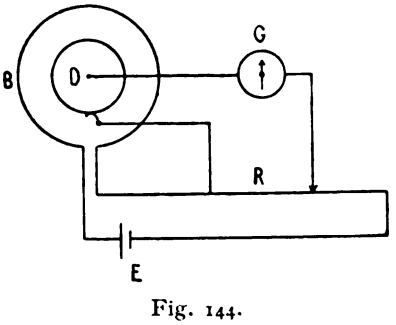


Fig. 144.

une vitesse mesurable, dans une bobine coaxiale B, traversée par le courant d'une pile E. On équilibre la différence de

potentiel existant entre le centre et la périphérie du disque à l'aide d'une résistance R intercalée dans le circuit de la pile et de la bobine. On se sert à cet effet d'un galvanomètre G.

Si la bobine est indéfinie et si le courant de la pile a une intensité I, le champ magnétique dans lequel se meut le disque vaut $4\pi n_1 I$, n_1 représentant le nombre de spires par unité de longueur suivant l'axe. En appelant S la surface du disque et N le nombre de révolutions de ce dernier par unité de temps, la force électromotrice induite suivant un rayon est $4\pi n_1 I S N$. Elle est égale à la chute ohmique I R, de sorte que

$$R = 4\pi n_1 S N.$$

Quand la bobine n'est pas assez longue pour qu'on puisse négliger l'influence des extrémités, on calcule, par la formule de Neumann, le coefficient d'induction mutuelle $\mathfrak{M}$ à substituer à $4\pi n_1 S$ dans le résultat précédent.

Cette méthode offre le grand avantage d'éliminer toutes les grandeurs électriques et de ramener l'approximation du résultat à celle atteinte dans la mesure de la vitesse du disque. Le nombre de tours est enregistré sur un tambour mobile, grâce à un contact porté par l'axe du disque.

Méthode de la perte de charge. — Voici une méthode indirecte qui peut être appliquée quand il s'agit d'évaluer des

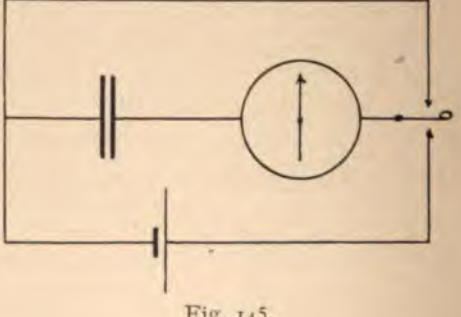


Fig. 145.

résistances très élevées, pour lesquelles il est difficile de se procurer des étalons du même ordre.

Soit à mesurer la résistance d'isolement entre les armatures d'un condensateur. On charge le condensateur et l'on détermine la différence de potentiel des armatures, soit au moyen d'un électromètre, soit en la déduisant de l'élongation accusée par un galvanomètre balistique intercalé dans le circuit de charge, fig. 145. On laisse ensuite le condensateur se décharger à travers son propre diélectrique, en isolant le levier de la clef de Sabine, et, au bout d'un temps t, on observe de nouveau la différence de potentiel, soit avec un électromètre, soit en déchargeant les armatures dans un galvanomètre.

On sait [1] qu'entre la résistance R du diélectrique, la capacité c du condensateur et les différences de potentiel V_0 et V_t existe la relation

$$t = c\,R \log_e \frac{V_0}{V_t}. \qquad (1)$$

Si c est exprimé en microfarads, R est donné en mégohms. De cette égalité l'on tire

$$R = -\frac{t}{c \log_e \frac{V_0}{V_t}}.$$

Le rapport des différences de potentiel est d'ailleurs ramené au quotient de deux lectures électrométriques ou galvanométriques :

$$R = \frac{t}{c \log_e \frac{\alpha_0}{\alpha_t}} = \frac{t}{2{,}3\,c \operatorname{Log} \frac{\alpha_0}{\alpha_t}}.$$

L'erreur relative résultant de l'inexactitude des lectures a pour expression

$$\frac{dR}{R} = -\frac{\frac{\alpha_0\,d\alpha_t - \alpha_t\,d\alpha_0}{\alpha_t^2}}{\frac{\alpha_0}{\alpha_t} \log_e \frac{\alpha_0}{\alpha_t}}$$

---

[1] Éric Gerard; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. IX. — Gauthier-Villars, Paris.

ou, en supposant $d\alpha_t = -d\alpha_0 = d\alpha$ et en posant $\alpha_0/\alpha_t = n$,

$$\frac{dR}{R} = \frac{n+1}{\log_e n}\frac{d\alpha}{\alpha_0}.$$

Elle est d'autant plus faible que α_0 est plus grand et $(n+1)/\log_e n$ plus petit. La valeur minima de ce dernier rapport correspond à

$$\log_e n = \frac{n+1}{n},$$

ou

$$n = e^{\frac{n+1}{n}} = e \times e^{\frac{1}{n}} = e\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{2n^2} + \dots\right).$$

En ne considérant que les deux premiers termes de la série, on trouve $n = 3{,}5$ (M. de Weydlich), mais, lorsque la résistance à mesurer est très élevée, le temps nécessaire pour satisfaire à cette condition est beaucoup trop long.

Dans la méthode considérée, comme dans toutes celles qui se rapportent à la mesure de très grandes résistances, il faut assurer avec un soin extrême l'isolement de tous les appareils insérés dans le circuit. Les pièces en ébonite, destinées à éviter les déperditions d'électricité, doivent être bien nettoyées et séchées ; les instruments utilisés seront posés sur des plaques de paraffine fraîchement coulées ou suspendus à des fils de soie sèche ; les conducteurs de connexion en contact avec la table d'expérience seront recouverts d'une forte couche de caoutchouc ou de gutta-percha ; enfin, la pile de charge doit être montée sur des isolateurs. Sans ces précautions, il peut arriver que la résistance d'isolement du circuit soit moindre que celle à évaluer.

La méthode de la perte de charge peut être étendue à la mesure de résistances élevées quelconques. Si l'on dispose d'un condensateur dont l'isolement est suffisant, on procède comme ci-dessus en dérivant la résistance cherchée x sur les armatures chargées. On trouve ainsi la résistance combinée $R\,x/(R+x)$ du condensateur et de x. Si la résistance inconnue x est assez

petite par rapport à R, le résultat de l'essai représente sensiblement sa valeur.

La méthode de mesure qui nous occupe est sujette à des erreurs systématiques importantes, provenant de ce que la résistance des diélectriques varie fortement avec la température, toujours difficile à évaluer avec précision, et, ce qui est plus grave, change avec la différence de potentiel agissante. Aussi ne peut-on guère viser à une exactitude supérieure à 2 pour 100. Pour obtenir des résultats concordants, il faut soumettre les diélectriques essayés aux mêmes tensions moyennes. De plus, il est à noter que les phénomènes d'ionisation, qui se produisent dans le voisinage des corps radio-actifs, peuvent modifier profondément les résistances d'isolement.

Il résulte de la variation de la résistance R avec la tension V qu'on n'est pas autorisé à intégrer l'équation différentielle

$$\frac{V}{R} = -c\frac{dV}{dt}$$

en supposant R constant, comme on le fait pour arriver à la relation (1). Mais on peut tracer la courbe $V = f(t)$, fig. 146,

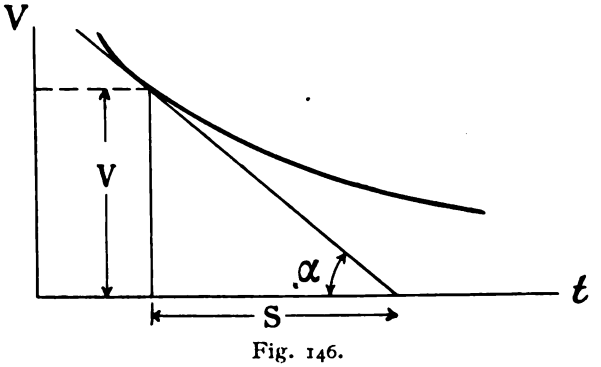


Fig. 146.

en observant, à l'aide d'un électromètre ou autrement, la chute de la tension avec le temps [1] et, comme, pour une différence

[1] Chauvin ; *Bull. de l'Ass. des ing. électr. sortis de l'Institut Montefiore.* 1904.

de potentiel donnée, $\frac{dV}{dt}$ est représenté par — tang α, il vient

$$\frac{V}{R} = c \text{ tang } \alpha = c \frac{V}{S},$$

S étant la sous-tangente. On a, par suite, $R = S/c$, de sorte qu'il est possible de relever sur la courbe en question les valeurs de la résistance correspondant aux diverses tensions.

Méthode par le voltmètre et l'ampèremètre. — La mesure des très petites résistances exige des dispositions spéciales qui seront détaillées plus loin. Dans les usines, on se sert fréquemment de la méthode indirecte suivante pour évaluer la résistance de l'induit des dynamos, qui n'atteint souvent qu'une faible fraction d'ohm. On envoie dans la résistance inconnue un courant estimé à l'aide d'un ampèremètre et l'on détermine la chute de potentiel qu'elle occasionne au moyen d'un voltmètre gradué pour de faibles tensions. Le rapport de l'indication du voltmètre à celle de l'ampèremètre représente la résistance cherchée. L'erreur relative limite qu'on peut commettre sur la valeur de celle-ci est la somme des erreurs relatives qu'entraîne l'emploi des deux instruments. Il faut donc utiliser un courant amenant les index vers l'extrémité des échelles, en ayant soin de ne prolonger son passage que pendant un temps insuffisant pour modifier d'une manière appréciable la température du conducteur soumis à l'essai.

Méthodes directes. Méthode de déviation. — La méthode de déviation repose sur la comparaison des courants que débitent des piles, dont les forces électromotrices sont dans un rapport déterminé, quand on les raccorde à la résistance inconnue et à une résistance étalon. Elle s'applique le plus souvent à la mesure des résistances de l'ordre du mégohm, c'est-à-dire très supérieures aux étalons dont on dispose généralement.

On commence par former le circuit de la fig. 147 au moyen d'un galvanomètre sensible à grande résistance g et pourvu d'un shunt dont le pouvoir multiplicateur est m, de la résistance

étalon r qu'on choisit aussi élevée que possible, ainsi que d'un élément de pile de force électromotrice e et de résistance intérieure ρ. On constate ainsi un courant

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r + \rho + \frac{g}{m}} \frac{1}{m}.$$

On substitue ensuite à l'étalon la résistance cherchée x. Dans le cas où celle-ci est constituée par la gaine isolante d'un

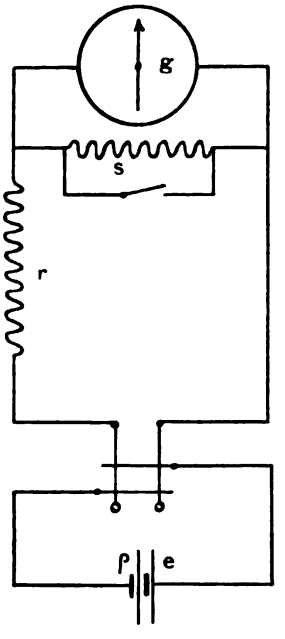


Fig. 147.

câble, il faut protéger le galvanomètre par une clef, qui le met en court-circuit au moment où l'on manœuvre l'inverseur de la pile, afin d'éviter que le courant de charge du câble ne projette trop vivement l'équipage mobile. Pour avoir une déviation permanente convenable, on est en général amené à employer n éléments de pile, dont les forces électromotrices ont été com-

parées par une mesure préalable, faite par exemple à l'aide du pont de compensation, à celle du couple utilisé d'abord, et à réduire le pouvoir multiplicateur du shunt à m'. Si tous les couples sont identiques au premier, on a alors

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{ne}{x + n\rho + \frac{g}{m'}} \frac{1}{m'}.$$

Par suite,

$$x = n \frac{m}{m'} \frac{\alpha}{\alpha'} \left(r + \rho + \frac{g}{m} \right) - \left(n\rho + \frac{g}{m'} \right).$$

$\rho + g/m$ est ordinairement négligeable devant r ; souvent même le terme $n\rho + g/m'$ peut être négligé devant celui qui le précède. L'équation se réduit dans ces conditions à

$$x = n \frac{m}{m'} \frac{\alpha}{\alpha'} r.$$

Comme les erreurs de lecture s'ajoutent dans l'estimation de l'erreur relative limite commise sur x, il faut chercher à obtenir des déviations aussi grandes que possible.

On a déjà fait remarquer que la mesure des grandes résistances exige un isolement particulièrement soigné des diverses parties des circuits, afin d'éviter les erreurs grossières que peuvent occasionner les courants de perte. Comme il est assez difficile d'isoler parfaitement les piles, il convient, lorsqu'on observe le courant qui traverse le diélectrique d'un câble, de placer le galvanomètre, non entre la pile et la terre, mais entre la pile et le câble, pour que le courant de perte de la pile ne passe pas dans le galvanomètre.

On pourrait supprimer le shunt dans la seconde expérience ; mais les cahiers des charges relatifs aux câbles prescrivent des tensions d'essai considérables, qui obligent le plus souvent à shunter le galvanomètre.

Quand on doit effectuer une série de mesures, on détermine au début la constante du galvanomètre rapportée au micro-ampère et l'on exprime les résistances en mégohms dans la formule

$$x = \frac{k}{\alpha'} ne \frac{1}{m'} - \left(np + \frac{g}{m'}\right),$$

où e représente des volts.

On verra dans un autre chapitre les précautions spéciales à employer dans les divers essais de résistance à l'isolement.

Méthode de M. Rousseau. — Si l'on doit comparer des résistances faibles, telles que r et x, on peut les relier en série à une pile primaire ou une petite batterie d'accumulateurs capable de débiter un courant constant et noter les déviations α et α' accusées par un galvanomètre proportionnel raccordé successivement aux extrémités des deux résistances. En négligeant les courants minimes dérivés dans le galvanomètre, on a

$$\frac{r}{x} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Dans le cas de résistances très inégales, on peut ajouter à la suite du galvanomètre, quand il est connecté à la plus grande, une résistance additionnelle dont la valeur est connue par rapport à celle de l'instrument.

L'exactitude de la méthode considérée est liée à la constance de la source électrique, de même qu'au soin de laisser en dehors des résistances comparées les contacts unissant celles-ci entr'elles et au générateur.

Ohmmètres. — Imaginons un galvanomètre dont l'aiguille mobile est soustraite autant que possible à l'action magnétique terrestre, grâce, par exemple, à la présence d'une seconde aiguille réalisant un système astatique ou d'un aimant directeur antagoniste. Supposons que deux cadres multiplicateurs disposés à angle droit agissent sur l'aiguille. Celle-ci prend dans ces conditions une position d'équilibre dépendant du quotient des courants qui passent dans les deux bobines. Dans le cas d'enroulements identiques et de courants égaux, le champ résultant est orienté à 45° par rapport aux plans des cadres. Avec des courants différents, l'équipage mobile s'incline sur le plan d'un des cadres d'un angle α tel que, si l'on appelle i le courant

qui traverse ce cadre et i' celui qui passe dans le cadre perpendiculaire,

$$\frac{i'}{\cos\alpha} = \frac{i}{\sin\alpha}$$

ou

$$\frac{i}{i'} = \operatorname{tang}\alpha.$$

Les appareils de l'espèce, susceptibles d'évaluer le rapport de deux intensités de courant, reçoivent parfois le nom de *comparateurs de courants*.

Quand on introduit les deux bobines dans deux circuits soumis à une même différence de potentiel, la position d'équilibre est déterminée par le rapport des résistances dérivées. On peut tirer parti de cette remarque pour la mesure des résistances, en graduant l'échelle de l'instrument par l'insertion en série avec l'un des multiplicateurs de résistances variables dont on inscrit les valeurs sur le cadran, de façon que celui-ci renseigne directement des ohms.

MM. Ayrton et Perry, ainsi que M. Evershed, ont réalisé des ohmmètres de ce genre servant à estimer approximativement la résistance d'isolement des circuits électriques. Par l'addition d'un shunt de pouvoir multiplicateur connu, 100 par exemple, entre les bornes de la bobine appartenant à la dérivation de résistance invariable, on peut évaluer, avec la même graduation, des résistances 100 fois plus grandes. Pour rendre l'influence du champ magnétique terrestre tout à fait négligeable devant l'action des enroulements, on doit faire usage d'une force électromotrice assez grande. M. Evershed utilise une petite machine magnéto-électrique à courants redressés, qui développe environ 100 volts. Il est du reste recommandable de soumettre les circuits essayés à une différence de potentiel assez élevée.

M. Carpentier a appliqué le principe du galvanomètre à aimant fixe dans la construction d'un ohmmètre moins influencé que les appareils à aiguille aimantée par les machines dynamo-électriques, fig. 148. L'équipage mobile, pivotant entre pointes dans des chapes en agate, comporte deux bobines orientées

à angle droit et entourant des noyaux en fer doux superposés. Les pièces polaires de l'aimant fixe sont planes, afin que le couple électromagnétique sollicitant chacun des cadres varie, pour un même courant, avec la déviation. Les courants sont amenés aux enroulements par des boudins flexibles. Pour

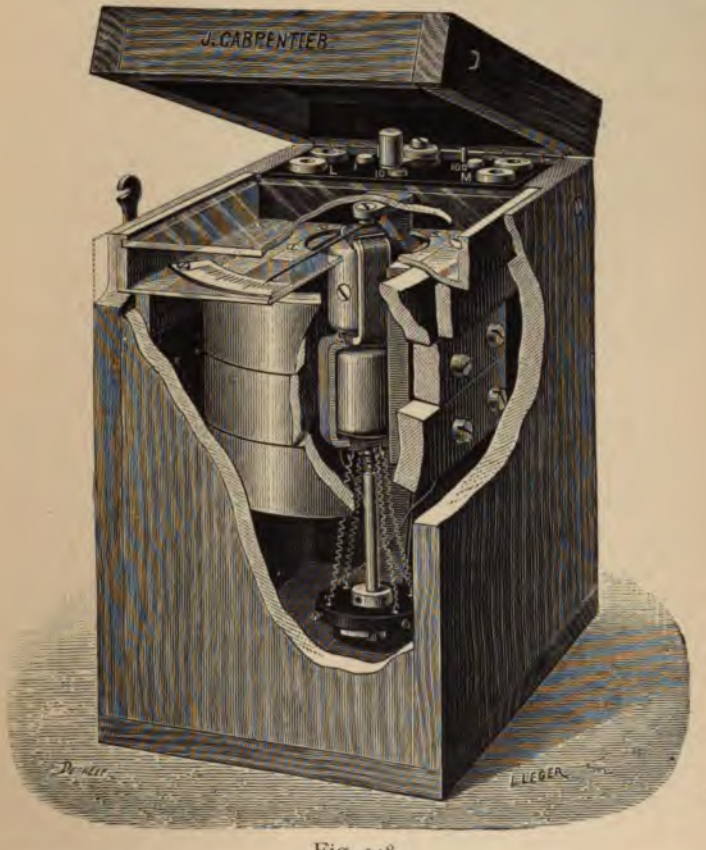


Fig. 148.

rendre l'effort de torsion de ceux-ci négligeable, M. Carpentier emploie également une petite magnéto donnant 120 volts à la vitesse de 100 tours par minute. L'induit de cette machine est partagé en 8 sections et le collecteur comprend 8 lames, afin que les pulsations du courant ne soient pas trop considérables.

Sans cette précaution, les effets de charge, qui troublent les mesures d'isolement des câbles, pourraient fausser sérieusement les résultats. L'approximation que procure cet instrument est d'environ 5 pour 100.

Les dispositions précédentes ne permettent de déterminer avec quelque précision que les résistances égales ou supérieures à celle des cadres multiplicateurs. On pourrait toutefois se servir d'un appareil analogue pour mesurer les faibles résistances. On ferait, dans ce cas, passer un courant de quelques ampères, fourni par un accumulateur, dans la résistance inconnue x et dans une résistance étalon r reliées en série ; les deux circuits de l'ohmmètre seraient dérivés, l'un sur x et l'autre sur r. Dans l'hypothèse de l'égalité des résistances des circuits galvanométriques, les courants dérivés dans ceux-ci seraient dans le rapport des résistances comparées. Une graduation préalable pourrait être faite comme pour les grandes résistances.

On qualifie parfois d'ohmmètres des galvanoscopes accompagnés d'une pile, dont on a gradué le cadran par des expériences consistant à intercaler des résistances croissantes dans leur circuit, les valeurs de ces résistances étant inscrites sur la graduation vis-à-vis des déviations observées. Le raccordement d'un tel appareil à une résistance inconnue permettrait d'évaluer celle-ci, si la force électromotrice pouvait être considérée comme invariable. Ces dispositifs réclament de fréquents réétalonnages et ne peuvent être employés que pour des essais grossiers.

Méthodes de zéro. Méthode du galvanomètre différentiel. — Plusieurs cas sont à considérer :

1° La résistance à mesurer est plus grande que celle des enroulements du galvanomètre différentiel.

On met alors la résistance inconnue et la boîte de résistances étalons en série chacune avec l'une des bobines du galvanomètre, fig. 149. Lorsque l'équipage mobile demeure au zéro, on a

$$x = r.$$

Avec un galvanomètre sensible, il faut, pour commencer le réglage, réduire la différence de potentiel agissante, car il serait trop difficile de shunter également les deux circuits galvanométriques. Pour cela, on relie la pile à une résistance sur une partie de laquelle on dérive le galvanomètre. Quand le réglage est à peu près terminé, on peut utiliser la force électromotrice totale de la source.

A moins d'utiliser un rhéostat de comparaison réglable par degrés insensibles, on ne parvient généralement pas à trouver une résistance pour laquelle la déviation s'annule. Soient α la déviation à droite obtenue avec une valeur r et α' la déviation

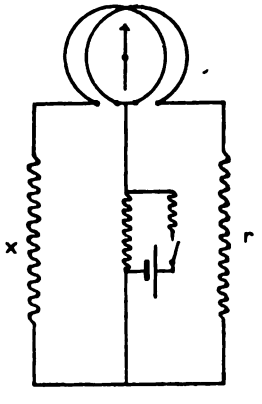


Fig. 149.

à gauche que détermine une résistance $r + 1$. Par interpolation, il vient

$$x = r + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}.$$

On tire de là

$$dx = \frac{\alpha' d\alpha - \alpha\, d\alpha'}{(\alpha + \alpha')^2}$$

et, en cumulant les erreurs de lecture supposées égales,

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{x(\alpha + \alpha')}. \qquad (1)$$

constituées par des résistances graduées ; la branche x est occupée par le conducteur dont on cherche la résistance. Un galvanomètre occupe la cinquième branche, tandis qu'une pile de force électromotrice e et de résistance ρ est insérée dans la sixième. La forme schématique de la figure par laquelle on représente ordinairement cette disposition lui a fait donner le nom de *parallélogramme de Wheatstone*. Les quatre *côtés* du parallélogramme sont reliés par la *diagonale* de la pile et par celle du galvanomètre.

L'intensité du courant dans le galvanomètre est donnée par l'expression suivante, déduite des lois de Kirchhoff :

$$i = \frac{e\,(bc - ax)}{\left\{\begin{array}{l} \rho\,(a+b)(c+x) + g\,(a+c)(b+x) \\ + \rho\, g\,(a+b+c+x) + bx\,(a+c) + ac\,(b+x) \end{array}\right\}} = \frac{bc - ax}{\mathrm{M}}. \qquad (1)$$

Quand la relation $bc = ax$ est satisfaite, le courant s'annule dans le galvanomètre. On a alors

$$x = \frac{b}{a}\,c.$$

Cette formule montre que les résistances des branches conjuguées b et c ou a et x ne peuvent pas être les deux plus grandes ou les deux plus petites. Les résistances les plus fortes, de même que les plus faibles, sont donc adjacentes. Comme il est possible de permuter le galvanomètre et la pile, on doit se demander quelle est, pour des résistances a, b, c et x données, la combinaison la plus avantageuse. Les résistances les plus faibles shuntent soit le galvanomètre, ce qui est le cas si a et b sont par exemple ces résistances, soit la pile. Il paraît naturel de shunter ainsi celui des deux appareils dont la résistance est la plus petite, pour que l'atténuation de sensibilité soit minima. On peut se convaincre qu'il doit en être ainsi, en déterminant l'intensité i' du courant dans le galvanomètre supposé permuté avec la pile et en prenant la différence entre i et i'. On verrait que cette différence est positive lorsque, dans la première disposition, la diagonale dont la résistance est

onction des côtés adjacents
nction des côtés adjacents les
résistance du galvanomètre
à celle de la pile. Il convient
unter le galvanomètre par les

être satisfaite par une infinité
amené à chercher quelles sont
résistances qui, pour une légère
par exemple, occasionnent le plus
nsité du courant à travers le gal-

une variation di dont l'expression,
uelle on a introduit l'hypothèse

ou

$$\frac{i\,dc}{N}. \qquad (2)$$

Il
forc
n'att
proc
con

ndent di maximum sont [1]

$$i = \sqrt{\rho g},$$

$$\sqrt{\frac{\rho + x}{g + x}}.$$

sultats dans (2) et en considérant le
à appréciable au galvanomètre, on
ne produit plus d'effet sur l'appareil
peut commettre sur la résistance
on a recours à des rhéostats à curseur
l'équipage mobile au zéro. On obtient

$$= -\frac{b\,N}{e\,a\,x}\,\frac{d\alpha}{k},$$

a et b par leurs valeurs ci-dessus. Il

Cette p
de la mar

[1] — Vaschy : *Traité d'Électricité et de Magné-*

fois plus grand que celui de la pile voisine, fig. 151. En appelant m le pouvoir multiplicateur du shunt, on a, sous les réserves formulées à propos de la méthode de déviation,

$$x = m n r.$$

4° Si le galvanomètre n'est pas exactement différentiel, on adopte une méthode analogue à la double pesée, en substituant à la résistance cherchée x une résistance connue qui ramène l'équilibre de l'équipage mobile et dont la valeur est par conséquent égale à x.

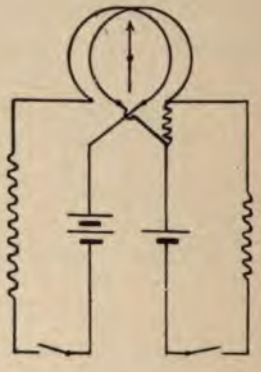


Fig. 151.

Un autre artifice consiste à intervertir x et r en faisant varier r jusqu'à ce que le galvanomètre donne la même lecture avec les deux dispositions. Quand ce résultat est atteint, $r = x$.

Enfin, on peut se servir d'un instrument dont les deux circuits ont des constantes galvanométriques inégales, en déterminant préalablement le rapport de celles-ci.

A l'erreur systématique provenant de l'imperfection du réglage des deux circuits galvanométriques s'ajoute souvent celle due à l'existence de forces thermo-électriques différentes résultant d'inégalités de température. Ces raisons font généralement donner la préférence au procédé suivant.

Pont de Wheatstone. Principe de la méthode. Positions du galvanomètre et de la pile. Valeurs les plus favorables

toutes les résistances entières depuis 1 jusqu'à 10 000 ohms environ. Le quatrième côté est constitué par la résistance inconnue. L'appareil présente, en outre, deux clefs, qui permettent de fermer la diagonale de la pile et celle du galvanomètre aux moments des observations. Il faut avoir soin d'abaisser la clef de la pile avant celle du galvanomètre et de relever celle-ci la première, en vue d'éviter des effets d'extra-courant dans le galvanomètre.

Fig. 154.

Lorsque l'équilibre est obtenu, on a

$$x = \frac{b}{a} c.$$

Le rapport b/a pouvant recevoir les valeurs 1/100, 1/10, 1, 10, 100 et c étant réglable de 1 à 10 000 ohms, il est possible de mesurer les résistances comprises entre 0,01 et 1 000 000 ohms. Dans quelques modèles on trouve aussi des résistances égales à 1 ohm dans les branches de proportion, ce qui fournit en plus les rapports 0,001 et 1000 entre les valeurs de ces branches.

On vérifie rapidement un pont en insérant par des connexions de résistance négligeable un étalon de 100 ohms dans la branche inconnue et en constatant si le galvanomètre reste au zéro quand on débouche les résistances de comparaison correspondant aux rapports 1/100, 1/10, 1, 10 et 100.

Pour mesurer une résistance inconnue, on commence par des branches de proportion égales, afin de voir son ordre de grandeur. On choisit ensuite pour a et b les valeurs les plus voisines de celles qui assurent le maximum de sensibilité et on relie le galvanomètre, dont la résistance dépasse ordinairement celle de la pile, au point de jonction des côtés les plus résistants et à celui des côtés les moins résistants. Il va sans dire que, si la résistance cherchée est très grande ou très petite, on n'a pas le choix du rapport à adopter pour les branches de proportion. On détermine les résistances c et $c + 1$ donnant des déviations α et α' de part et d'autre de la position de repos du galvanomètre. On a, en interpolant,

$$x = \frac{b}{a}\left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}\right).$$

Pour trouver l'erreur limite due à l'inexactitude des lectures, il suffit de différentier cette expression par rapport à α et α', en posant ensuite $d\alpha' = -d\alpha$; il vient

$$dx = \frac{b}{a}\frac{d\alpha}{\alpha + \alpha'}$$

et

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{\left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}\right)\left(\alpha + \alpha'\right)}.$$

Il est facile à voir que α et α' varient en sens inverse de c. Avec un galvanomètre sensible, on sera conduit à augmenter la résistance de comparaison le plus possible, en réduisant le rapport b/a. En supposant $d\alpha = 1$, $\alpha + \alpha' = 100$ et $c = 100$, on peut commettre sur x une erreur relative d'environ 0,000 1. Il est évidemment inutile d'accroître c au delà de la valeur à partir de laquelle 1 ohm en plus n'influence plus le galvanomètre. Il n'y a donc pas lieu de recourir à l'interpolation lorsqu'on mesure de grandes résistances et qu'on ne dispose pas d'un instrument très sensible.

A l'erreur causée par les lectures viennent s'ajouter celles dues à l'imperfection de graduation des bobines ainsi qu'aux

résistances le contact des fiches et aux connexions reliant la résistance inconnue au pont.

Il est bon de noter la température de la résistance inconnue, même que celle du pont s'il est construit en un alliage dont les coefficients de température n'est pas négligeable. Lorsqu'on veut connaître très exactement la température d'un fil en métal on se sert de le plonger dans un bain de pétrole où baigne un thermomètre.

Pour restreindre l'échauffement des résistances, on n'utilise que deux éléments de pile et on ne tient les clefs abaissées que pendant le temps requis par les lectures. On fait usage de bobines ayant une résistance suffisante pour que le courant ne puisse atteindre une intensité dangereuse pour les bobines. Les piles sèches sont d'un emploi commode pour ces mesures. Si la force électromotrice du galvanomètre est trop forte, il vaut mieux la réduire par une résistance en série avec l'instrument que de shunter, qui diminuerait la résistance de la diagonale du galvanomètre et accroîtrait le courant de la pile avec le risque d'occasionner des échauffements nuisibles. Pour ne pas échauffer les bobines des résistances du pont, on raccorde souvent la pile non directement à celui-ci, mais à une boîte de résistance, sur une partie r de laquelle le pont est dérivé. On emploie une différence de potentiel d'autant plus grande que r est plus grand.

Pont à fil divisé. — Le pont à fil divisé est particulièrement commode pour la graduation de résistances par comparaison avec des résistances étalons de même grandeur. Utilisée d'abord par Foster, cette méthode a été perfectionnée par MM. Benoit et de Nerville. On la pratique dans une température aussi constante que possible, les résistances étant placées dans des bains de pétrole et l'autre dans de la glace fondante.

Elle emploie un fil droit et calibré, en platine iridié, soudé aux extrémités d'une série de blocs en cuivre. Le long de ce fil peut glisser un curseur de contact, dont la position est repérée, au vingtième de millimètre près,

sur une échelle divisée parallèle au conducteur, par un vernier mû au besoin à l'aide d'une vis micrométrique, fig. 156. On adopte ordinairement un alliage dur et inoxydable, contenant 90 en poids de platine et 10 d'iridium. Le diamètre du fil

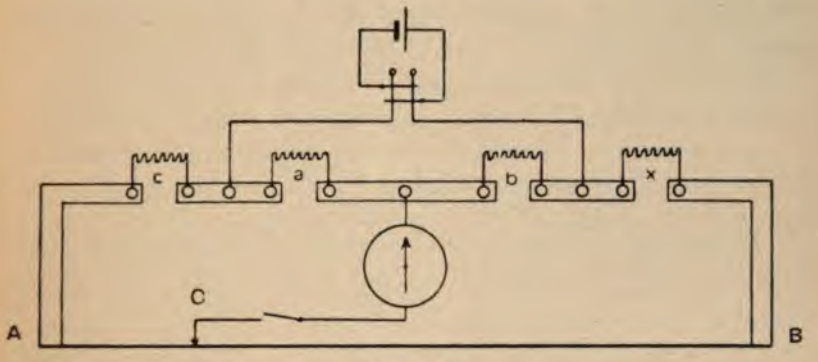


Fig. 155.

mesure 0,5 à 1 mm et sa résistance 2 à 0,5 ohm par mètre. Le bouton d'appui du curseur ne permet pas la pression directe de la main sur le fil ; l'effort est transmis par un ressort, pour éviter l'écrasement du conducteur. La pile du pont réalisé par l'ensemble du système n'est pas raccordée au curseur, de crainte d'endommager le fil par l'étincelle de rupture en cas de soulèvement du contact mobile.

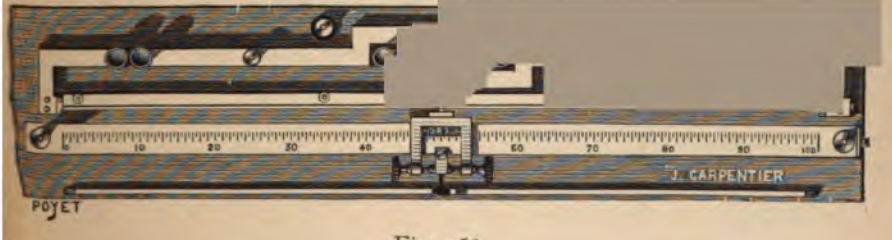


Fig. 156.

Après avoir ajusté la résistance à étalonner x aussi exactement que possible au moyen d'un pont ordinaire à bobines, on l'insère entre deux des blocs de cuivre. En a, b et c sont dis-

résist
résist
On
de m
le co
doit
pur,
le th
P
qu'u
que
cou
puis
Les
Si l
la r
par
galv
d'a
inut
pile
tan
On
élev

P
men
son
d'al
par
des
rési
les
Se
de l
cuiv
dont

et aussi voisines que
nditions de sensibilité
galvanomètre et celle de
nexions avec les blocs de
eable, sont établies par
fixés aux blocs. Appe-
de l'échelle et soit l_1 la
du galvanomètre. On a la

$$- l_2)$$

on R, on trouve une autre

$$- l_2$$
$$- l_2)$$

$$- l_2)$$
$$- (l_1 - l_2)$$

ces résistances et en répétant

$$- l'_2)$$
$$- (l'_1 - l'_2)$$

$$- l_2 + l'_1 - l'_2).$$

esistances comparées est ainsi
sistance linéaire du fil. Si l'étalon-
ait au millième, cette différence
, de sorte que, si elle est à son
valeur de x peut être considérée
es.
au moyen d'un commutateur, le sens
pile, pour détruire l'influence des
t autres qui peuvent naître dans le

Calibrage d'un fil. — Le calibrage du fil du pont ci-dessus peut s'effectuer de la manière suivante. Après avoir vérifié à l'aide d'une bonne jauge l'uniformité de section du fil, on fait passer dans celui-ci un courant assez faible pour ne pas l'échauffer d'une façon appréciable et l'on appuie dessus deux cavaliers portés par une entretoise isolante et présentant des lignes de contact bien nettes. On relie ces cavaliers à un galvanomètre très sensible et l'on observe si la déviation de l'instrument reste constante pour diverses positions données successivement aux cavaliers. Si la déviation varie, on use le fil aux endroits où ses tronçons ont une résistance trop faible, à moins qu'on ne préfère employer une table de corrections. Reste à déterminer la résistance totale de la partie divisée du fil, pour en déduire la valeur r d'une division. Il faut aussi évaluer les résistances comprises entre les extrémités de cette partie et les blocs d'attache correspondants du pont. Il suffit pour cela de dériver le galvanomètre entre chaque extrémité et le bloc voisin. Les résistances ainsi trouvées seront exprimées en millimètres de fil calibré.

Un procédé de calibrage, indiqué par MM. Stouhal et Barus, consiste à dériver sur le fil une série de n bobines de résistances égales, connectées par des liaisons de résistance négligeable. En soumettant l'ensemble du fil et des bobines à une différence de potentiel, on peut, à l'aide d'un galvanomètre relié d'une part au curseur et d'autre part successivement aux $n - 1$ points de jonction des bobines, déterminer sur le fil $n + 1$ points comprenant entr'eux la même résistance.

Enregistreur Callendar. — L'enregistreur de M. Callendar utilise un pont à fil divisé pour inscrire les variations de la résistance électrique d'un conducteur et, par suite, celles des quantités physiques, telles que la température, dont cette résistance dépend. L'appareil comporte, outre le pont, un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, ainsi qu'un cylindre d'enregistrement. Le curseur du fil divisé se déplace automatiquement sous l'action du galvanomètre agissant comme relais et note sa position d'équilibre sur le cylindre au moment de l'arrêt. Dans

ce but, une aiguille portée par le cadre multiplicateur envoie, quand celui-ci dévie, un courant dans l'un ou l'autre des deux électro-aimants qui commandent le mouvement de droite et le mouvement de gauche du curseur ; tant que le curseur se meut, la plume est écartée du cylindre, sur lequel elle appuie au repos.

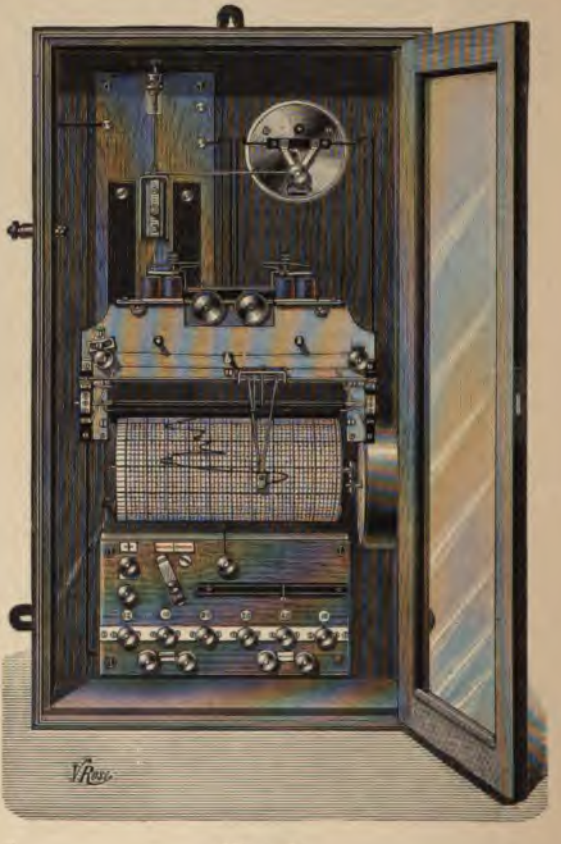


Fig. 157.

Double pont de Lord Kelvin. — Les dispositions de pont précédentes ne se prêtent pas à la mesure exacte de résistances très faibles, parce que la résistance des contacts s'ajoute à celle des conducteurs essayés, ce qui expose à des erreurs notables sur les résultats. Pour l'évaluation des petites résis-

tances, il faut des procédés permettant d'éliminer l'influence des contacts.

La méthode de Lord Kelvin réalise la combinaison de conducteurs figurée par les arêtes d'un tétraèdre tronqué et appelée double pont par analogie avec le pont simple, représenté par les arêtes d'un tétraèdre entier.

Si l'on analyse par les lois de Kirchhoff le réseau de la fig. 158, ainsi formé, on obtient, pour le courant dans le galvano-

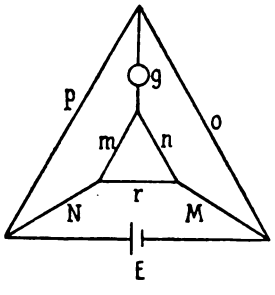


Fig. 158.

être, l'expression suivante, dans laquelle Δ est une quantité essentiellement positive :

$$i = \frac{E}{\Delta}\left\{ r\,(pn - om) + (m + n + r)\,(p\mathrm{M} - o\mathrm{N})\right\}.$$

s'annule quand les résistances satisfont à la relation

$$\frac{p}{o} = \frac{m}{n} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{M}}.$$

Toutefois, si r est assez petit, le galvanomètre reste au zéro pour $p\mathrm{M} - o\mathrm{N}$.

En vue d'appliquer le circuit ci-dessus à la mesure de la résistance d'une certaine longueur de barre métallique, on appuie celle-ci, désignée par M dans la fig. 159, sur des couteaux *h k* et *l i* distants de cette longueur. La résistance de comparaison N est constituée par un gros fil de platine iridié ou de manganine, tendu parallèlement à une règle graduée et sur lequel peuvent glisser des curseurs *c c*. Le fil étalon et la

barre à essayer sont reliés en série à une pile secondaire B pouvant débiter un courant de 5 à 15 ampères. Au moyen de quatre résistances p, o, m, n on forme deux dérivations réunies par un galvanomètre sensible.

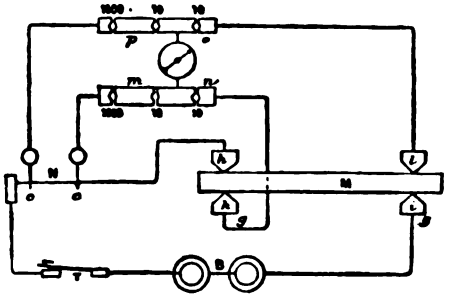


Fig. 159.

Les résistances p, o, m, n étant choisies de manière que $p/o = m/n$, on déplace les curseurs c c jusqu'à ce que le galvanomètre n'accuse plus de courant. Dans ces conditions, la résistance du segment de fil compris entre les curseurs est à celle de la portion de barre limitée par les couteaux dans le rapport m/n. Les résistances de contact sont négligeables devant les résistances p, o, m, n, auxquelles elles s'ajoutent.

La précision de cette méthode, qui permet d'évaluer la résistance d'un mètre de barre de cuivre à 0,1 pour 100 près, tient, d'une part, à la sensibilité du galvanomètre et, d'autre part, à l'exactitude avec laquelle on détermine la position des curseurs sur le fil. Le calibrage plus ou moins parfait et l'usure de ce dernier amènent une erreur $dM/M = dN/N$. Pour estimer l'importance de l'erreur résultant du défaut de sensibilité du galvanomètre, appelons $d\alpha$ la plus petite déviation appréciable. Soient k la constante de l'appareil et I le courant principal, supposé invariable. L'intensité i correspondant à $d\alpha$ peut être considérée comme due à une tension $I\,dN$ appliquée au circuit du galvanomètre shunté par une résistance $o + M + n$, où M est négligeable devant $o + n$. On a donc, en admettant que $p = m$ et $o = n$,

$$\frac{d\alpha}{k} = \frac{\mathrm{I}\,d\mathrm{N}}{2m + \dfrac{2ng}{2n+g}} \cdot \frac{2n}{2n+g},$$

soit

$$d\mathrm{N} = \frac{d\alpha}{\mathrm{I}\,k}\left\{g\left(\mathrm{I} + \frac{m}{n}\right) + 2m\right\}.$$

Méthode de la Reichsanstalt pour la comparaison des résistances étalons. — L'étalonnage des copies des multiples et sous-multiples de l'ohm peut se faire par un procédé d'interpolation, appliqué au pont de Wheatstone quand les connexions sont négligeables et au double pont de Kelvin dans le cas contraire.

Le dispositif, représenté par les fig. 160 et 161, comporte une

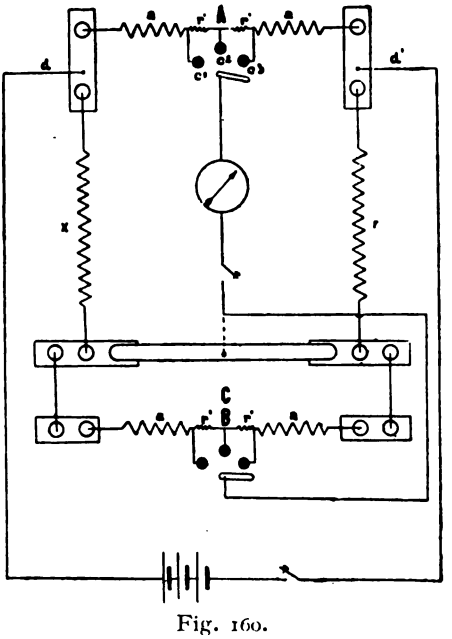


Fig. 160.

boîte de résistances A formant deux branches de proportion égales $a + r'$, la résistance à étalonner x et un étalon de comparaison r de même grandeur. Le galvanomètre peut être raccordé

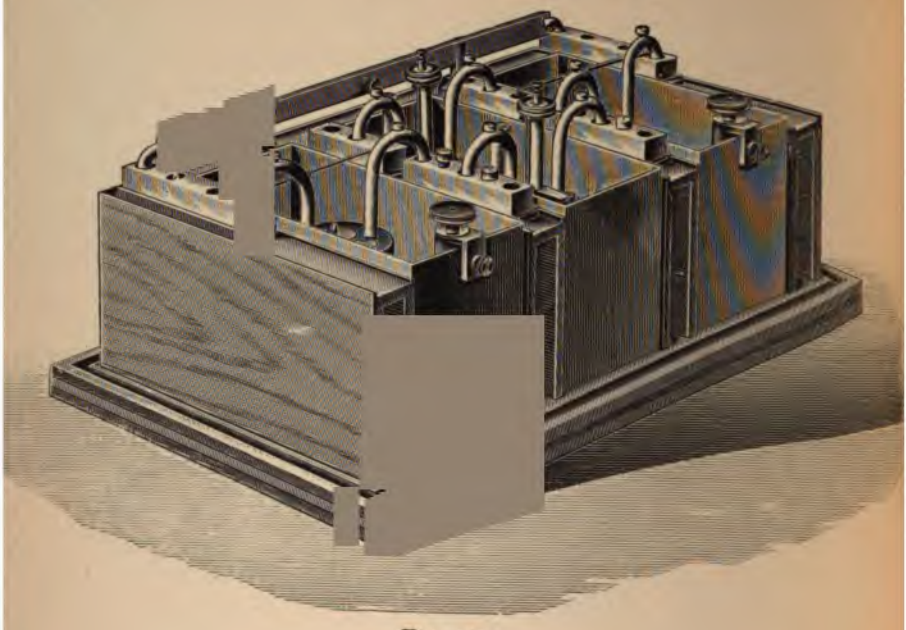


Fig. 161.

Fig. 162.

en c_1, c_2 ou c_3. Entre c_1 et c_2 d'une part, c_2 et c_3 d'autre part, se trouvent deux petites résistances d'interpolation r'. Les résistances a sont de 100 ohms pour la comparaison des résistances supérieures à 0,1 ohm ; les résistances d'interpolation r' valent alors 0,1 ou 0,05 ohm, comme le montre la fig. 162.

Cas du pont simple.

Quand la seconde borne du galvanomètre est mise en communication avec le milieu d'une grosse lame de cuivre C, dont les extrémités plongent dans des godets à mercure, la combinaison réalise un pont de Wheatstone, fig. 163, auquel la pile est reliée de telle façon que les résistances des blocs de raccordement d et d' s'ajoutent aux résistances a.

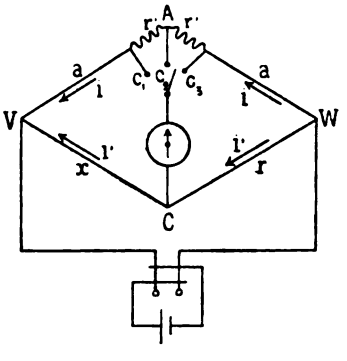


Fig. 163.

Toutes les résistances sont placées dans des bains de pétrole, pour éviter les changements de valeur dus aux écarts de température ainsi que les couples thermo-électriques qui peuvent résulter de ceux-ci. Pour rechercher l'influence de la température sur l'une des résistances comparées, il suffit de chauffer le pétrole dans lequel elle est noyée par un conducteur où circule un courant électrique, en ayant soin d'utiliser un agitateur dans le but d'uniformiser la température.

La différence $r - x$ des deux résistances à comparer se déduit des déviations accusées par le galvanomètre quand on le relie aux contacts c_1, c_2 et c_3.

Lorsque le commutateur est en c_2, le galvanomètre reste au zéro si $r = x$. Mais, quand une légère différence existe entre ces résistances, un courant α/k traverse l'instrument. On peut l'attribuer à la différence entre les chutes de tension dans les côtés WC et WA, en écrivant

$$\frac{i' r - i(a + r')}{g} = \frac{\alpha}{k}.$$

Si l'on renverse le sens du courant de la pile, ce qui équivaut à permuter r et x, on obtient une déviation contraire α', telle que

$$\frac{i' x - i(a + r')}{g} = -\frac{\alpha'}{k}.$$

De ces deux équations, on déduit

$$\frac{i'(r - x)}{g} = \frac{\alpha + \alpha'}{k}. \qquad (1)$$

En reprenant le sens primitif du courant et en plaçant le commutateur sur c_3, on a une déviation α_1 satisfaisant à l'égalité

$$\frac{i' r - i a}{g} = \frac{\alpha_1}{k}.$$

Le commutateur étant tourné sur c_1, il vient, si l'écart entre r et x est très faible,

$$\frac{i' r - i(a + 2r')}{g} = -\frac{\alpha'_1}{k}.$$

Par suite,

$$\frac{2 i r'}{g} = \frac{\alpha_1 + \alpha'_1}{k}. \qquad (2)$$

Divisons (1) par (2), en introduisant la relation $i'/i = a/r$. On trouve

$$\frac{i'(r - x)}{2 i r'} = \frac{a}{r}\frac{(r - x)}{2r'} = \frac{\alpha + \alpha'}{\alpha_1 + \alpha'_1},$$

d'où l'on tire

$$r - x = 2\frac{\alpha + \alpha'}{\alpha_1 + \alpha'_1}\frac{r'}{a} r.$$

Avec $r' = 0{,}001\ a$, la formule finale devient

$$r - x = 0{,}002\ r\ \frac{\alpha + \alpha'}{\alpha_1 + \alpha'_1}.$$

Pour éliminer certaines erreurs, dues à des défauts de réglage, on peut prendre des déviations moyennes, en intervertissant les branches de proportion.

Une différence $r - x$ de $0{,}001\ r$ s'estime facilement à 0,01 près, ce qui procure une approximation de 0,001 pour 100 dans la détermination de x en fonction de r.

Cas du pont double.

Pour la comparaison des résistances vis-à-vis desquelles les résistances de la pièce C, des godets à mercure et des contacts sont appréciables, le montage est converti en double pont de Kelvin, fig. 164, en ajoutant au système une boîte B semblable

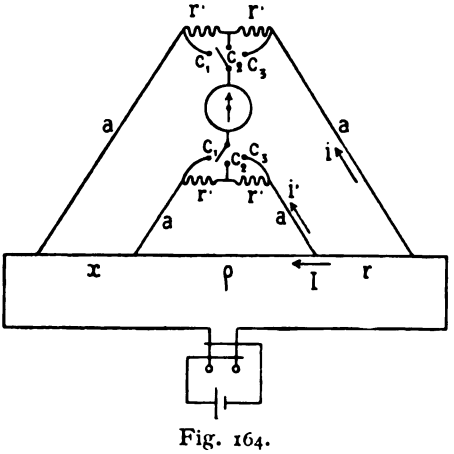


Fig. 164.

à la boîte A. Le galvanomètre est alors dérivé entre les boîtes A et B.

Si l'on raisonne comme dans le cas précédent, on trouve successivement : avec les commutateurs en c_2,

$$\frac{\{I r + i'(a + r')\} - i(a + r')}{g} = \frac{\alpha}{k}$$

ation A se détermine en remarquant qu'au
. On trouve ainsi

$$A = \log_e \frac{E}{r}$$

$$\log_e \frac{i}{\frac{E}{r}} = -\frac{t}{cr};$$

$$i = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{cr}}.$$

:e électromotrice E correspond l'équation

$$i = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{cr}}.$$

ons que les quatre côtés d'un parallélo-
ne, fig. 166, contiennent quatre résistances

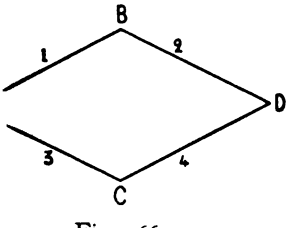


Fig. 166.

capacités c_1, c_2, c_3, c_4.
ıe une différence de potentiel V aux
vanomètre inséré entre les points B et
ant pendant le régime variable, c'est
ant

$$= i_2, \quad i_3 = i_4$$

$$\int i_1 \, dt = v_{AC} = i_3 r_3 + \frac{1}{c_3} \int i_3 \, dt. \qquad (1)$$

et, après inversion du sens du courant de la pile,

$$\frac{\{I x + i'(a + r')\} - i(a + r')}{g} = -\frac{\alpha'}{k},$$

de sorte que

$$\frac{I(r - x)}{g} = \frac{\alpha + \alpha'}{k}; \qquad (1)$$

avec le sens primitif du courant et les commutateurs d'abord en c_3,

$$\frac{\{I r + i' a\} - i a}{g} = \frac{\alpha_1}{k},$$

puis en c_1,

$$\frac{\{I r + i'(a + 2r')\} - i(a + 2r')}{g} = -\frac{\alpha'_1}{k},$$

d'où

$$\frac{2r'(i - i')}{g} = \frac{\alpha_1 + \alpha'_1}{k}$$

ou, en posant $i = I(r + \rho + x)/2a$ et $i' = I\rho/2a$, c'est-à-dire $i - i' = I(r + x)/2a = Ir/a$,

$$\frac{2r'}{a}\frac{Ir}{g} = \frac{\alpha_1 + \alpha'_1}{k}; \qquad (2)$$

enfin, en éliminant $k\,I/g$ entre (1) et (2),

$$r - x = 2\,\frac{\alpha + \alpha'}{\alpha_1 + \alpha'_1}\,\frac{r'}{a}\,r,$$

comme pour le pont simple.

Il est à conseiller de changer le sens du courant de la pile, pour supprimer l'influence des couples thermo-électriques, et de permuter les branches de proportion ainsi que r et x, pour se mettre à l'abri des défauts de réglage et des inégalités dans les connexions.

Vérification d'une boîte de résistances. — Si l'on dispose d'une boite de résistances étalons ainsi que de résistances à interpolation, on peut recourir à la méthode de la Reichsanstalt pour comparer les bobines correspondantes de la boîte étalonnée et de la boite à vérifier. Il est nécessaire que les plots des

boîtes présentent des orifices coniques pour l'insertion de fiches avec bornes permettant de raccorder isolément une bobine quelconque.

On peut aussi faire la comparaison par le moyen du galvanomètre différentiel.

Si l'on n'a pas de boîte graduée, il faut comparer les diverses résistances de la boîte à l'essai entr'elles et estimer l'une d'elles à l'aide d'un étalon. Pour ce contrôle, on reproduit autant que possible chacune des résistances de la boîte par une somme de résistances plus faibles.

Soit, par exemple, la série des unités 1, 1', 2, 2', 5, où la

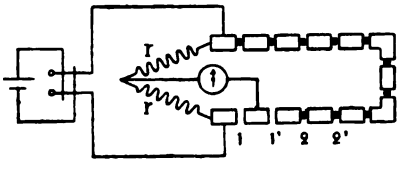


Fig. 165.

résistance 1' est parfois remplacée par la série des dixièmes 0,1, 0,2, 0,2', 0,5. On forme un pont de Wheatstone avec deux bobines auxiliaires égales r, fig. 165. Avec les fiches dans les positions indiquées, on compare 1' à 1. On a soin d'intervertir le courant de la pile, pour éviter l'influence des couples thermo-électriques, et de permuter les résistances r, pour compenser leur faible différence éventuelle. La conductance des connexions de ces résistances doit être élevée. On compare de même 2 à 1 + 1', 2' à 2, 5 à 1' + 2 + 2' et, finalement, 1' + 2 + 2' + 5 à un étalon R de 10 ohms. En appelant a, b, c,.... les écarts trouvés, on a

$$1' = 1 + a,$$

$$2 = 1 + 1' + b = 2.1 + a + b,$$

$$2' = 2 + c = 2.1 + a + b + c,$$

$$5 = 1' + 2 + 2' + d = 5.1 + 3a + 2b + c + d,$$

$$1' + 2 + 2' + 5 = R + e = 10.1 + 6a + 4b + 2c + d;$$

d'où

$$1 = \frac{R + e - 6a - 4b - 2c - d}{10} = \frac{R + f}{10},$$

$$1' = \frac{R + f}{10} + a,$$

$$2 = 2\,\frac{R + f}{10} + a + b,$$

$$2' = 2\,\frac{R + f}{10} + a + b + c,$$

$$5 = 5\,\frac{R + f}{10} + 3a + 2b + c + d.$$

On dresserait semblablement la table de corrections des dizaines, des centaines, etc.

Propriétés du pont de Wheatstone pour les courants variables. — Nous aurons l'occasion d'utiliser dans la suite l'ingénieuse combinaison du pont de Wheatstone pour la mesure des capacités et des coefficients d'induction, en mettant à profit l'influence de ces quantités sur les courants variables. Il est donc intéressant de rechercher les propriétés du pont relatives aux courants variables.

Cas des capacités.

Rappelons d'abord que, si l'on introduit une force électromotrice constante E dans le circuit formé d'une résistance r et d'une capacité c en série, on a, dans le régime variable,

$$E = ir + \frac{1}{c}\int i\,dt,$$

de sorte que

$$0 = r\frac{di}{dt} + \frac{i}{c} \quad \text{et} \quad \frac{di}{i} = -\frac{dt}{cr},$$

équation différentielle dont l'intégrale générale est

$$\log_e i = -\frac{t}{cr} + A.$$

La constante d'intégration A se détermine en remarquant qu'au temps $t = 0$, $i = E/r$. On trouve ainsi

$$A = \log_e \frac{E}{r}$$

et, par suite,

$$\log_e \frac{i}{\frac{E}{r}} = -\frac{t}{cr};$$

d'où

$$i = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{cr}}.$$

Au retrait de la force électromotrice E correspond l'équation

$$i = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{cr}}.$$

Cela établi, supposons que les quatre côtés d'un parallélogramme de Wheatstone, fig. 166, contiennent quatre résistances

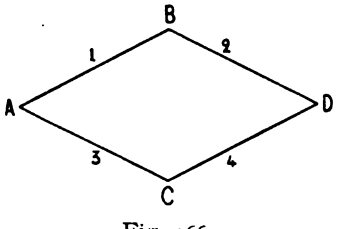


Fig. 166.

r_1, r_2, r_3, r_4 et quatre capacités c_1, c_2, c_3, c_4.

Si, quand on applique une différence de potentiel V aux sommets A et D, un galvanomètre inséré entre les points B et C n'accuse pas de courant pendant le régime variable, c'est l'indice qu'à chaque instant

$$i_1 = i_2, \quad i_3 = i_4$$

et

$$v_{AB} = i_1 r_1 + \frac{1}{c_1}\int i_1\, dt = v_{AC} = i_3 r_3 + \frac{1}{c_3}\int i_3\, dt. \qquad (1)$$

Comme, dans les conditions considérées,

$$i_1 = -\frac{V}{r_1 + r_2}\, e^{-\frac{(c_1 + c_2)\, t}{c_1 c_2 (r_1 + r_2)}},$$

$$i_3 = -\frac{V}{r_3 + r_4}\, e^{-\frac{(c_3 + c_4)\, t}{c_3 c_4 (r_3 + r_4)}},$$

l'équation (1) peut être mise sous la forme

$$V\left(\frac{r_1}{r_1 + r_2} - \frac{c_2}{c_1 + c_2}\right) e^{-\frac{(c_1 + c_2)\, t}{c_1 c_2 (r_1 + r_2)}} = V\left(\frac{r_3}{r_3 + r_4} - \frac{c_4}{c_3 + c_4}\right) e^{-\frac{(c_3 + c_4)\, t}{c_3 c_4 (r_3 + r_4)}},$$

qui montre qu'elle est satisfaite quand

$$\frac{r_1}{r_1 + r_2} - \frac{c_2}{c_1 + c_2} = \frac{r_3}{r_3 + r_4} - \frac{c_4}{c_3 + c_4} \qquad (2)$$

et

$$\frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2 (r_1 + r_2)} = \frac{c_3 + c_4}{c_3 c_4 (r_3 + r_4)}. \qquad (3)$$

Dans le cas particulier où $c_1 = \infty$, $c_3 = \infty$, $r_2 = 0$ et $r_4 = 0$, la condition (2) se réduit à une identité et la condition (3) conduit à la formule

$$c_2 r_1 = c_4 r_3,$$

utilisée dans la méthode indiquée par M. de Sauty pour la comparaison des capacités.

Cas des coefficients d'induction.

Admettons à présent que les quatre côtés du parallélogramme soient constitués par des résistances inductives correspondant aux notations r_1, $\mathcal{L}_1$, r_2, $\mathcal{L}_2$, r_3, $\mathcal{L}_3$, r_4, $\mathcal{L}_4$.

Les conditions d'équilibre dans le régime variable sont, dans cette hypothèse,

$$i_1 = i_2, \qquad i_3 = i_4,$$

$$i_1 r_1 + \mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} = i_3 r_3 + \mathcal{L}_3 \frac{di_3}{dt}, \qquad (4)$$

avec

$$i_1 = \frac{V}{r_1 + r_2}\left(1 - e^{-\frac{(r_1 + r_2)\,t}{\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2}}\right),$$

$$i_3 = \frac{V}{r_3 + r_4}\left(1 - e^{-\frac{(r_3 + r_4)\,t}{\mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4}}\right).$$

En remplaçant i_1, i_3, di_1/dt et di_3/dt par leurs valeurs dans (4), il vient

$$\frac{r_1}{r_1 + r_2} + \left(-\frac{r_1}{r_1 + r_2} + \frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2}\right) e^{-\frac{(r_1 + r_2)\,t}{\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2}}$$

$$= \frac{r_3}{r_3 + r_4} + \left(-\frac{r_3}{r_3 + r_4} + \frac{\mathcal{L}_3}{\mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4}\right) e^{-\frac{(r_3 + r_4)\,t}{\mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4}}.$$

Cette équation est satisfaite quand

$$\frac{r_1}{r_1 + r_2} = \frac{r_3}{r_3 + r_4} \quad \text{ou} \quad r_1 r_4 = r_2 r_3,$$

en même temps que

$$\frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2} = \frac{\mathcal{L}_3}{\mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4}$$

et

$$\frac{r_1 + r_2}{\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2} = \frac{r_3 + r_4}{\mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4},$$

ce qui implique la relation

$$\frac{\mathcal{L}_1}{r_1} + \frac{\mathcal{L}_4}{r_4} = \frac{\mathcal{L}_2}{r_2} + \frac{\mathcal{L}_3}{r_3};$$

d'après laquelle les sommes des constantes de temps des côtés opposés doivent être égales.

On sait (1) qu'une capacité c dérivée sur une résistance r

(1) Éric Gerard; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. XVII, p. 254. — Gauthier-Villars, Paris.

joue, dans la période variable, le rôle d'une self-induction $\mathcal{L}$ telle que

$$\mathcal{L} = -\nu^2.$$

On peut donc étendre la propriété précédente au cas où la substitution susdite est effectuée dans un des côtés du parallélogramme.

On verra le parti qu'on peut tirer de ces déductions pour la mesure des coefficients d'induction.

Chapitre XIII.

MESURE DES CAPACITÉS.

Méthode indirecte de Jenkin. — On charge le condensateur dont on cherche la capacité au moyen d'une pile de force électromotrice e, puis on le décharge dans un galvanomètre. Dans le cas d'un appareil Deprez et d'Arsonval, on a, chap. VI, si l'amortissement est faible,

$$c = \frac{q}{e} = \frac{\alpha}{e\,K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right),$$

K étant la constante balistique et λ le décrément logarithmique.

On relève ensuite la déviation occasionnée par le courant que le même couple produit dans un circuit de résistance R. En désignant par k la constante permanente du galvanomètre,

$$\frac{\beta}{k} = \frac{e}{R}.$$

On tire de là

$$c = \frac{\alpha}{\beta R}\frac{k}{K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) = \frac{\alpha}{\beta R}\frac{T_0}{\pi}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right).$$

L'erreur relative limite qui entache c est sensiblement la somme des erreurs relatives commises sur α, β et T_0.

Dans la formule précédente, il est nécessaire de bien distinguer les unités choisies : les angles, entrant sous forme de rapport, peuvent être remplacés par les nombres de divisions lus sur l'échelle ; T_0 est la durée en secondes d'une demi-oscillation sans amortissement ; R doit être exprimé en mégohms pour obtenir c en microfarads.

Une remarque générale s'applique à toutes les méthodes de mesure des capacités : il faut veiller soigneusement à l'isolement des circuits, car une négligence sous ce rapport peut amener la décharge partielle ou totale des armatures et introduire ainsi des erreurs grossières dans les résultats.

La période d'oscillation du galvanomètre doit être grande comparativement à la durée de la décharge du condensateur. Pour s'en assurer, on ajoute en série avec le galvanomètre une résistance égale à celle de ce dernier. Si, en répétant l'expérience, on obtient la même élongation balistique, la condition est satisfaite.

Rigoureusement, la méthode ci-dessus ne peut convenir qu'aux condensateurs où le résidu est nul ou négligeable. Avec les condensateurs à papier paraffiné, on peut commettre une erreur atteignant 5 pour 100 par suite de ce que la décharge résiduelle agit pendant le déplacement de l'équipage du galvanomètre. L'approximation ne dépasse pas 1 pour 100 avec les condensateurs à mica.

Si la capacité du condensateur à essayer est trop faible, on utilise le procédé de répétition de la décharge pour avoir une élongation renforcée, chap. VI.

Il est à noter que la capacité peut varier avec la température. Aux températures ordinaires, la capacité des condensateurs à mica augmente d'environ 0,02 pour 100 quand la température baisse de 1° C.

Cas des condensateurs à résidu. — Quand le diélectrique présente un résidu qui prolonge sensiblement la durée de la charge et de la décharge, la capacité propre du condensateur correspond à la quantité d'électricité qui s'écoule au premier

instant de la décharge (1). Soient q la *charge disponible* ainsi définie et e la différence de potentiel des armatures ; on a

$$c = \frac{q}{e}.$$

On peut estimer cette charge disponible en remplaçant le levier de la clef de Sabine par l'une des branches d'un diapason dont les vibrations sont entretenues électriquement. Si n désigne le nombre de décharges effectuées par seconde dans le galvanomètre, on obtient une déviation α liée au courant moyen i par la formule

$$i = nq = nce = \frac{\alpha}{k},$$

où k est la constante permanente de l'appareil. Il faut exprimer e en volts et rapporter k au micro-ampère pour tirer de là c en microfarads.

Pour que l'emploi de la méthode indiquée soit justifié, il faut que, pendant la durée du contact avec la pile produit par le diapason, le condensateur ait pris sa charge normale. Dans le but de s'en assurer, on fait varier la période de vibration du diapason par des poids pouvant glisser le long de ses branches et on examine s'il n'en résulte pas un changement sensible du résultat.

Les contacts à pression du diapason laissent quelque incertitude. Il vaut mieux recourir aux contacts frottants d'une roue commutatrice actionnée par un électromoteur dont on mesure le nombre de révolutions par seconde. Il est nécessaire, pour le contrôle de l'essai, d'opérer à différentes vitesses. On procède successivement par charge et par décharge, comme dans la méthode suivante, pour vérifier l'état d'isolement du circuit.

On peut tirer un excellent parti du système de répétition rapide des décharges pour déterminer de très faibles capacités, avec lesquelles les procédés ordinaires ne donnent pas de résultats satisfaisants.

---

(1) Éric Gerard ; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. VII. — Gauthier-Villars, Paris.

[illegible] de comparaison. — La [illegible] laquelle on utilise un conden- [illegible]ement employée.

[illegible]rgé à l'aide d'une pile par [illegible]sion k_1 et d'une clef de charge [illegible] provoquée par le courant de [illegible] En manœuvrant k_2, on note [illegible]e courant de décharge. Si les [illegible] parfaitement isolées, les deux [illegible]e courant de perte accroît la

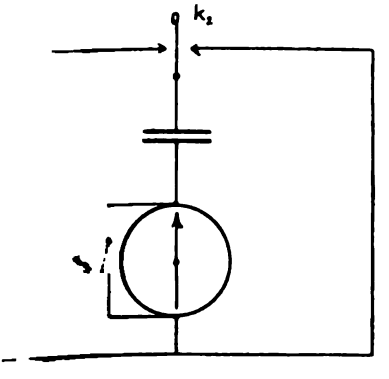


Fig. 167.

[illegible]conde : on prend, dans ce cas, l'élon- [illegible] clef de court-circuit destinée à arrêter [illegible]ètre, quand celui-ci est un appareil [illegible]val. Il faut avoir soin de relever la [illegible] d'inversion, car, si l'on opère dans [illegible]teur se vide par cette dernière.

[illegible] le condensateur étalon, en ayant [illegible]urée de charge.

[illegible], α et α' les élongations, on a

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

[illegible]eur relative limite,

$$\frac{dc}{c} = \frac{\alpha' + \alpha}{\alpha\,\alpha'}\,d\alpha = \frac{1 + \frac{\alpha}{\alpha'}}{\alpha}\,d\alpha,$$

en supposant les erreurs de lecture égales. Il est facile à voir que l'influence de celles-ci est la plus faible quand α est le plus grand possible et α' voisin de α. Si les élongations correspondant aux deux condensateurs étaient trop différentes, on pourrait utiliser des piles de forces électromotrices inégales ou munir le galvanomètre de shunts appropriés. Mais, dans ce dernier cas, il conviendrait de faire entrer en ligne de compte les décréments logarithmiques, éliminés ci-dessus, à moins de recourir à un shunt universel maintenant le galvanomètre fermé sur une résistance constante.

Dans les laboratoires industriels, on applique la méthode de comparaison même aux câbles à fort résidu, car il y a intérêt pratiquement à faire intervenir celui-ci. On mesure alors souvent la décharge après une durée d'électrisation de 1 minute environ, en employant une pile de 50 à 100 volts.

Méthode de Faraday. — On commence par charger le condensateur c, fig. 168, et le décharger à travers le galvanomètre : on observe une élongation α telle que

$$\frac{\alpha}{K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) = c\,e.$$

Après l'avoir rechargé, on réunit les deux condensateurs c et c' par la clef k_1, la clef k_2 étant ouverte ; puis on décharge dans le galvanomètre la quantité d'électricité restée dans le condensateur c. En appelant e' la différence de potentiel commune des armatures des deux condensateurs après la réunion, on a

$$(c + c')\,e' = c\,e$$

et, si α' est la nouvelle élongation,

$$\frac{\alpha'}{K}\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) = c\,e' = c\,\frac{c\,e}{c + c'}.$$

Il résulte de là que

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

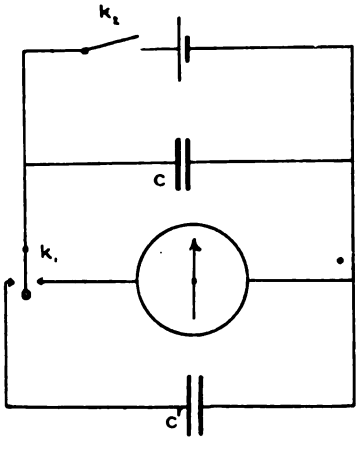


Fig. 168.

On a vu au chap. I que, pour une expression de cette forme, l'erreur relative limite est minima quand α est maximum et égal à $2{,}4\,\alpha'$. Elle n'est pas sensiblement plus grande si l'on adopte le rapport $\alpha/\alpha' = 2$, qui conduit à

$$\frac{dc}{c} = 6\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthodes de zéro. Méthode de M. de Sauty. — Le dispositif, analogue au pont de Wheatstone, comporte deux résistances réglables r et r' sans self-induction, les deux condensateurs c et c' à comparer, un galvanomètre balistique g et une pile réunie au pont par une clef de charge et de décharge k.

On modifie les résistances r et r' jusqu'à ce que, lors de l'abaissement et du relèvement de la clef, le galvanomètre ne dévie plus. Comme on l'a vu au chapitre précédent, on a alors

$$\frac{c}{c'} = \frac{r'}{r}.$$

Pour trouver les meilleures conditions d'expérience, appelons i, i' et i'' les valeurs instantanées des courants qui, pendant la charge des condensateurs par exemple, traversent les branches r, r' et g lorsque l'équilibre n'est pas encore atteint.

L'application de la seconde loi de Kirchhoff au circuit formé par ces trois branches donne la relation

$$i r - i'' g - i' r' = \mathfrak{L} \frac{di''}{dt},$$

où $\mathfrak{L}$ représente le coefficient de self-induction du galvanomètre. En multipliant les deux membres par dt, puis intégrant le

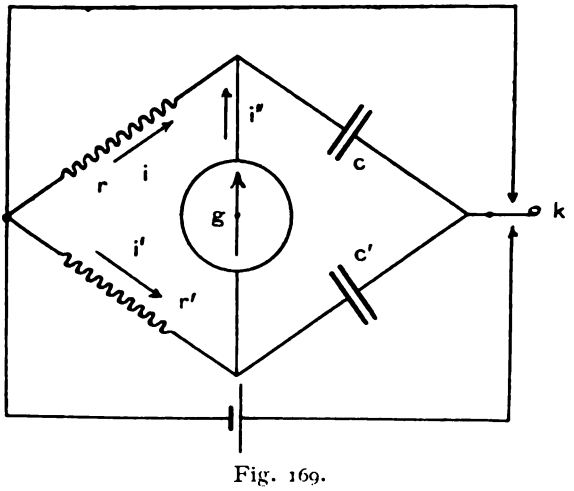


Fig. 169.

premier entre les limites o et τ de la durée de la charge et le second entre les valeurs nulles que présente le courant i'' au commencement et à la fin de celle-ci, il vient

$$q r - q'' g - q' r' = o.$$

Mais, si e désigne la force électromotrice de la pile,

$$q + q'' = ce \qquad \text{et} \qquad q' - q'' = c'e.$$

Par suite, abstration faite de l'amortissement du galvanomètre,

$$q'' = \frac{e(cr - c'r')}{g + r + r'} = \frac{\alpha}{K}.$$

A une erreur de lecture $d\alpha$ correspond une erreur dc telle que

$$\frac{e\,r\,dc}{g+r+r'} = \frac{d\alpha}{K},$$

de sorte que

$$\frac{dc}{c} = \left(\frac{g}{r'c'} + \frac{c+c'}{cc'}\right)\frac{d\alpha}{Ke}.$$

Pour réduire dc/c, il convient donc de choisir K, e et aussi grands que possible. r sera alors grand aussi, puisqu'il est à r' dans le rapport de c' à c. Il est toutefois inutile de prendre pour r et r' des valeurs plus élevées que celles pour lesquelles une variation de 1 ohm ne produit plus d'élongation sensible au galvanomètre.

Méthode de M. Gott. — La méthode précédente est sujette à plusieurs erreurs, résultant de ce que la self-induction et la capacité des bobines du pont ne sont généralement pas négligeables et de ce que les condensateurs peuvent donner lieu à des courants de perte entre les armatures. Ce dernier inconvénient existe toujours lorsqu'on mesure la capacité d'un câble. Dans ce cas, une autre cause perturbatrice importante provient du fait que la durée de charge des câbles est beaucoup

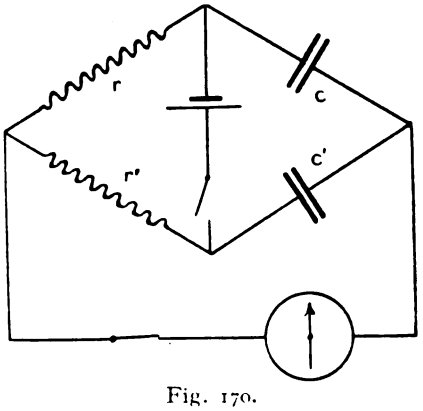


Fig. 170.

plus grande que celle des condensateurs étalons. Il s'ensuit que les potentiels aux bornes du galvanomètre ne sont pas égaux à chaque instant : l'étalon se chargeant rapidement, le

galvanomètre est traversé pendant les premiers moments par un courant dirigé vers ce condensateur et ensuite par un courant qui se porte vers le câble.

M. Gott a cherché à résoudre ces difficultés en intervertissant la pile et le galvanomètre, fig. 170. On ferme d'abord la clef de la pile de manière à laisser le régime permanent s'établir dans les résistances et les capacités, puis on abaisse la clef du galvanomètre pour vérifier si le potentiel du point de jonction des résistances est égal à celui du point de jonction des condensateurs. Quand cette condition est satisfaite, on a en appelant i le courant dans les résistances et q la charge des condensateurs,

$$ir = \frac{q}{c} \qquad \text{et} \qquad ir' = \frac{q}{c'};$$

d'où

$$\frac{r}{r'} = \frac{c'}{c}.$$

Les meilleures conditions d'expérience sont les mêmes que dans la méthode de M. de Sauty.

On évite, par cette modification, les effets sur le galvanomètre de la self-induction des bobines r et r', ainsi que de la durée prolongée de charge du câble; mais le galvanomètre est encore influencé par le courant de perte du câble.

Un dispositif analogue à celui de M. Gott a été employé par M. Campbell pour comparer les pouvoirs inducteurs des diélectriques. Dans le but de réduire les effets de capacité résiduelle et de conductibilité, à la pile est adjoint un vibrateur microphonique actionné par un mécanisme trembleur capable de produire une fréquence de 1000 à 2000 périodes par seconde. Un récepteur téléphonique est mis à la place du galvanomètre comme appareil détecteur.

Méthode de Lord Kelvin. — Pour supprimer tous les défauts signalés ci-dessus, Lord Kelvin a adopté la méthode suivante, fig. 171, qui se prête à la détermination de la capacité des longs câbles.

On charge le câble c' et le condensateur étalon c en abais-

sant les clefs 1, 2 et 3. Si i est le courant qui traverse les résistances r et r', les condensateurs c et c' prennent des quantités d'électricité

$$q = c\,i\,r \qquad \text{et} \qquad q' = c'\,i\,r'.$$

On relève ensuite les clefs 2, 3 et 1, et l'on abaisse la clef 4 de manière à permettre aux condensateurs de se décharger l'un

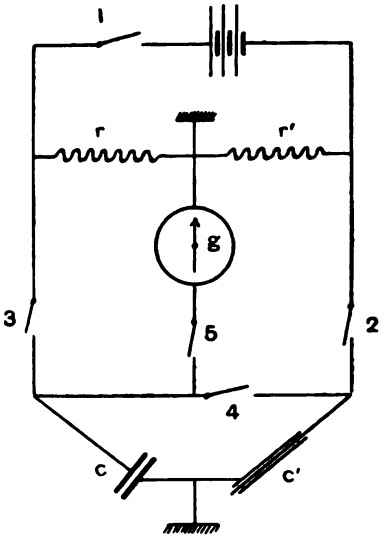


Fig. 171.

dans l'autre. Enfin on ferme la clef 5, afin d'écouler le résidu de charge des condensateurs dans le galvanomètre. En réglant r et r' de telle sorte que ce résidu soit nul, on a

$$c\,r = c'\,r'.$$

Comme dans les procédés précédents, on choisit r et r' assez grands pour qu'une différence de 1 ohm dans la valeur de l'une de ces résistances ne cause pas de déplacement appréciable du galvanomètre.

Il est recommandé de manœuvrer les clefs dans l'ordre indiqué, sinon l'on s'expose à ce que les condensateurs se déchargent dans les résistances.

Chapitre XIV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Cas d'un courant continu. Wattmètre. — La puissance électrique absorbée par un récepteur soumis à une différence de potentiel V et parcouru par un courant continu d'intensité constante I a pour expression V I. Ce produit peut être déterminé par voie indirecte, en mesurant séparément les facteurs V et I à l'aide d'un des procédés indiqués précédemment, ou par voie directe, au moyen d'appareils appelés wattmètres.

Les wattmètres les plus employés sont des électrodynamomètres à torsion. Cependant on a constitué d'excellents appareils de contrôle avec des balances de Kelvin transformées en wattmètres.

La bobine fixe de l'électrodynamomètre, composée d'un petit nombre de tours de gros fil, est disposée en série avec le circuit consommant la puissance à mesurer, fig. 172. La bobine mobile, ordinairement composée de quelques spires de fil fin, est mise en tension avec une grande résistance et l'ensemble est dérivé sur les points qui limitent le circuit étudié.

Appelons r la résistance de la bobine fixe, R celle de la bobine mobile et du rhéostat additionnel, V la différence de potentiel des points a et b, I l'intensité du courant qui passe

au point *a*. Le couple électrodynamique qui sollicite la bobine mobile est proportionnel à

$$I \times \frac{V + Ir}{R}.$$

Il est mesuré par une torsion θ. Si r est suffisamment petit, on peut négliger Ir devant V et il vient

$$\theta = \frac{VI}{A}.$$

Lorsque les expériences sont faites près de dynamos ou de conducteurs parcourus par des courants dont on craint l'influence, on peut, pour supprimer les perturbations, dédoubler

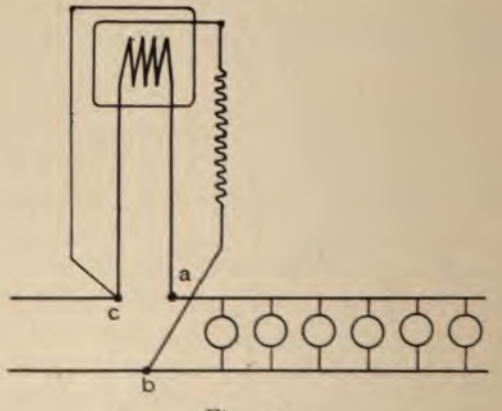


Fig. 172.

les deux bobines de manière à constituer un équipage mobile astatique. On vérifie si le champ magnétique terrestre n'agit pas sur la bobine mobile en renversant le sens du courant dans le circuit et en observant si la déviation reste la même.

Les connexions indiquées dans le schéma amènent, comme on le voit, une légère erreur en trop dans les indications du wattmètre, puisque la différence de potentiel aux bornes du circuit dérivé est accrue de la chute de tension dans la bobine fixe. Si l'on raccordait le circuit de la bobine mobile directement au récepteur, on commettrait encore une erreur positive,

car la bobine fixe serait alors traversée par le courant utile augmenté du courant dérivé. L'appareil fonctionnerait dans ce cas même si le circuit d'utilisation était interrompu, car il y aurait toujours du courant dans les deux bobines.

Il est important d'insérer la bobine mobile entre la bobine fixe et la résistance additionnelle, car, si l'on intercalait cette dernière entre la bobine fixe et la bobine mobile, les deux enroulements pourraient présenter entr'eux des différences de potentiel suffisantes pour occasionner des accidents à l'appareil. Une raison semblable conduit à subdiviser les rhéostats pour tensions élevées en sections nombreuses, de façon qu'une différence de potentiel dangereuse ne puisse exister dans chacune d'elles.

Il faut avoir soin de contrôler la valeur du facteur de réduction A pour diverses puissances, afin de s'assurer si la proportionnalité des déviations subsiste. On détermine ce facteur en reliant le wattmètre à un conducteur de résistance donnée traversé par un courant d'intensité connue. On peut aussi faire passer dans les deux bobines des courants indépendants, le circuit ampèremétrique étant contrôlé par un ampèremètre étalon et le circuit voltmétrique par un voltmètre étalon.

Il est aisé d'estimer l'erreur relative commise en négligeant Ir : son expression est

$$\frac{I^2 r}{V I} = \frac{I r}{V}.$$

Cas des courants périodiques. — Lorsque la puissance électrique est transportée sous forme de courants alternatifs, le choix d'une méthode de mesure réclame une attention toute particulière.

Il y a alors deux cas à distinguer : 1) le conducteur qui absorbe la puissance à évaluer a une réactance négligeable; 2) la réactance de ce conducteur ne peut pas être négligée. Les lampes à incandescence satisfont pratiquement à la première condition.

Si les champs magnétiques constants n'ont pas d'action

perturbatrice sur les bobines mobiles des appareils de mesure traversés par des courants alternatifs, il faut, par contre, craindre la répulsion exercée par les courants de Foucault induits dans les pièces métalliques de consolidation. Il convient de diviser ces pièces et d'éviter les couvercles conducteurs.

Conducteurs sans réactance.

Lorsqu'un conducteur de cette catégorie est soumis à une différence de potentiel alternative, il est le siège d'un courant dont les phases coïncident avec celles de la tension agissante. Par suite, la puissance moyenne consommée est égale au produit des valeurs efficaces de la différence de potentiel et du courant.

On peut déterminer séparément l'intensité efficace du courant, à l'aide d'un électrodynamomètre, et la différence de potentiel efficace, au moyen d'un voltmètre convenant aux courants alternatifs.

Dans l'hypothèse où la puissance considérée est transformée intégralement en chaleur par effet Joule, on peut la déduire de l'intensité du courant ou de la différence de potentiel, mesurées respectivement par un électrodynamomètre ou par un voltmètre approprié. On a, en appelant ρ la résistance, supposée connue, du conducteur sur lequel on expérimente,

$$\frac{1}{T}\int_0^T v\,i\,dt = \rho\,\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt = \frac{1}{\rho}\,\frac{1}{T}\int_0^T v^2 dt.$$

Le procédé le mieux adapté aux essais industriels est l'emploi du wattmètre, auquel on peut recourir quelle que soit la loi du courant.

Il faut utiliser un appareil dont le circuit dérivé n'a pas de réactance appréciable. A cet effet, la résistance additionnelle doit être formée de conducteurs à inductance et capacité négligeables. Le courant dans le circuit dérivé est alors en phase avec la différence de potentiel et l'angle de torsion du wattmètre est proportionnel à la puissance moyenne cherchée :

$$\theta = \frac{1}{A}\,\frac{1}{T}\int_0^T v\,i\,dt.$$

Le facteur A se détermine au moyen d'une résistance traversée par un courant continu.

Souvent la réactance du circuit dérivé n'est pas négligeable, lorsque la résistance additionnelle est constituée par des bobines. Il en résulte un affaiblissement et un déphasage du courant dans ce circuit, qui ont pour effet de réduire l'indication du wattmètre en dessous de la valeur correspondant à la puissance réellement absorbée par le conducteur essayé.

On rendrait les lectures au wattmètre correctes en enroulant la bobine de résistance mise en série avec le cadre mobile de telle manière que sa capacité neutralise l'effet de la self-induction du circuit dérivé.

On peut apprécier l'erreur due à la réactance du circuit de l'équipage mobile, dans l'hypothèse d'ondes sinusoïdales, en remarquant que l'intensité efficace du courant dans ce circuit est

$$I' = \frac{V}{R} \cos \psi,$$

au lieu de V/R, de sorte que, si I désigne l'intensité efficace du courant principal, le couple électrodynamique moyen est proportionnel à $I I' \cos \psi = VI \cos^2 \psi / R$, puisque le produit moyen des valeurs instantanées de deux grandeurs sinusoïdales est égal au produit des valeurs efficaces de celles-ci multiplié par le cosinus de leur angle de déphasage. L'erreur relative vaut donc

$$\varepsilon = \frac{\frac{VI}{R} \cos^2 \psi - \frac{VI}{R}}{\frac{VI}{R}} = - \sin^2 \psi$$

et est essentiellement négative. Quand ψ est très petit, on peut remplacer le sinus par la tangente et écrire

$$\varepsilon = - \operatorname{tang}^2 \psi.$$

Dans le cas où la réactance du circuit dérivé du wattmètre est exprimée par $2\pi \mathcal{L}/T$, on a

$$\operatorname{tang} \psi = \frac{2\pi}{T} \frac{\mathcal{L}}{R}.$$

Si $T = 1/125^e$ de seconde, $R = 3000$ ohms, $\mathcal{L} = 0{,}383$ henry, on trouve alors $\varepsilon = -0{,}01$.

Conducteurs avec réactance.

L'expression de la puissance moyenne à mesurer est alors $V\,I\cos\varphi$, φ représentant l'angle de phase du conducteur à l'essai. La bobine fixe du wattmètre possède trop peu de spires pour altérer sensiblement cet angle.

Si, comme c'est généralement le cas, l'influence de la capacité des circuits est faible vis-à-vis de celle de leur self-induction, il existe un retard de phase du courant sur la différence de potentiel agissante, à la fois dans le circuit d'utilisation, où est inséré l'enroulement fixe du wattmètre, et dans le circuit dérivé de celui-ci. Il s'ensuit une tendance au rapprochement des phases des courants dans les deux circuits, ce qui peut avoir pour effet de renforcer l'indication de l'instrument au delà de la valeur correspondant à la puissance réelle, contrairement à ce qui se produit dans le cas d'un conducteur sans réactance.

Le courant qui passe dans la bobine mobile a une intensité efficace $V\cos\psi/R$ et la réaction électrodynamique des deux bobines est proportionnelle à

$$I\,\frac{V\cos\psi}{R}\,\cos(\varphi-\psi),$$

de sorte que l'erreur relative est

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= \frac{V\,I\cos\psi\cos(\varphi-\psi) - V\,I\cos\varphi}{V\,I\cos\varphi}\\ &= \cos^2\psi + \cos\psi\sin\psi\,\operatorname{tang}\varphi - 1\\ &= \cos\psi\sin\psi\,\operatorname{tang}\varphi - \sin^2\psi.\end{aligned}$$

Pour de petites valeurs de ψ, on peut poser

$$\varepsilon' = \operatorname{tang}\psi\operatorname{tang}\varphi - \operatorname{tang}^2\psi = \varepsilon + \operatorname{tang}\varphi\sqrt{-\varepsilon}.$$

Si φ est positif, ce qui a lieu quand il n'existe pas de capacité importante dans le circuit principal, l'erreur est négative et les indications de l'appareil sont trop faibles tant que $\varphi < \psi$. Mais, en général, $\varphi > \psi$ et l'erreur est positive.

Ainsi, avec $\varepsilon = -0{,}01$ et $\varphi = 60^\circ$, valeur qu'atteint le retard de phase dans les transformateurs statiques fonctionnant à vide, il vient $\varepsilon' = 0{,}163$. Ce résultat montre qu'avec un wattmètre capable de mesurer à 1 pour 100 près la puissance dans un conducteur sans réactance, on peut commettre des erreurs très considérables dans les circuits à forte inductance. En général, lorsque $\cos\varphi < 0{,}4$, le wattmètre donne peu d'exactitude.

En résumé, si le circuit où l'on mesure la puissance ainsi que le circuit dérivé du wattmètre ont des réactances positives, les indications de l'instrument sont ordinairement trop fortes; si le circuit dérivé possède une réactance négative, elles sont trop faibles. Si le circuit principal a une réactance négative, le résultat est habituellement trop grand quand le circuit dérivé a également une réactance négative; il est trop petit lorsque la réactance de ce dernier est positive. Enfin, dans le cas où le circuit principal n'a pas de réactance, tandis que celle du circuit dérivé n'est pas négligeable, les lectures sont toujours trop faibles.

Pour se faire rapidement une idée de la valeur d'un wattmètre, on le raccorde à un circuit sans réactance, tel que des lampes à incandescence, qu'on soumet à une différence de potentiel de valeur efficace constante et l'on fait croître la fréquence. Si les indications de l'appareil diminuent, c'est que la réactance de son circuit dérivé n'est pas négligeable.

Puisqu'un wattmètre pour lequel ψ n'est pas nul renseigne une puissance $V I \cos\psi \cos(\varphi - \psi)$, au lieu d'indiquer la puissance cherchée $V I \cos\varphi$, il faut, pour obtenir cette dernière, multiplier son indication par le rapport $\cos\varphi / \cos\psi \cos(\varphi - \psi)$. Connaissant le coefficient de self-induction $\mathcal{L}$ du circuit dérivé, on peut calculer ψ par la formule $\operatorname{tang}\psi = a\mathcal{L}/R$ et dresser un tableau des valeurs du terme de correction pour diverses pulsations a et différents déphasages φ.

Nous avons raisonné ci-dessus dans l'hypothèse de variations simplement sinusoïdales. Dans les autres cas, les harmoniques apportent des perturbations liées à leur fréquence et il n'est généralement plus possible d'estimer l'erreur provenant de

l'influence des inductances et capacités. Il faut alors s'attacher à réduire le plus possible la réactance du circuit dérivé du wattmètre.

Il peut arriver que les ondes du courant coïncident avec les ondes de la différence de potentiel, mais ne présentent pas les mêmes déformations. C'est ce que l'on constate dans les arcs à courants alternatifs. Il n'y a pas de déphasage et cependant il faut multiplier le produit des valeurs efficaces de la tension et du courant par un facteur de puissance, qui descend jusqu'à 0,7, pour obtenir la puissance absorbée. L'usage du wattmètre s'indique dans de telles conditions.

Courants polyphasés.

Considérons le cas des courants triphasés et supposons d'abord qu'on ait affaire au montage en étoile, fig. 173. Si les

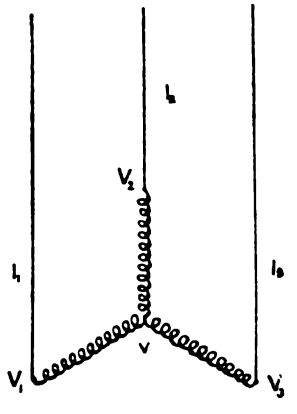


Fig. 173.

notations du schéma désignent les courants et les potentiels en grandeur et en signe à un moment quelconque, la puissance instantanée dépensée dans les trois branches est

$$p = I_1 (V_1 - v) + I_2 (V_2 - v) + I_3 (V_3 - v) \qquad (1)$$

et, comme on a constamment la condition

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \qquad (2)$$

on peut écrire plus simplement

$$p = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3,$$

expression qui, par l'élimination de I_3 grâce à (2), se ramène à

$$p = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3). \qquad (3)$$

Dans le cas du montage en triangle, fig. 174, il vient

$$p = i_1 (V_1 - V_2) + i_2 (V_2 - V_3) + i_3 (V_3 - V_1), \qquad (4)$$

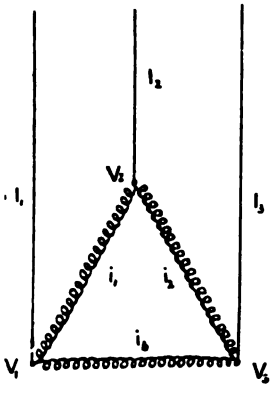


Fig. 174.

avec

$$I_1 = i_1 - i_3,$$
$$I_2 = i_2 - i_1;$$

d'où

$$p = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3), \qquad (5)$$

équation identique à (3).

Pour avoir la puissance moyenne, il suffit de prendre la somme des moyennes des produits formant les seconds membres de (1), (4) ou (5) :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_1 (V_1 - v)\, dt + \frac{1}{T} \int_0^T I_2 (V_2 - v)\, dt + \frac{1}{T} \int_0^T I_3 (V_3 - v)\, dt. \qquad (6)$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T i_1 (V_1 - V_2)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_2 (V_2 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_3 (V_3 - V_1)\, dt, \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T I_1 (V_1 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T I_2 (V_2 - V_3)\, dt. \quad (8)$$

Les termes des seconds membres des égalités (6) et (7) peuvent être obtenus à l'aide de trois wattmètres. Si θ, θ' et θ'' sont les indications de ces appareils, dont les constantes sont k, k' et k'',

$$P = \frac{\theta}{k} + \frac{\theta'}{k'} + \frac{\theta''}{k''}.$$

Dans le cas du montage en étoile, si le centre de celle-ci n'est pas accessible, il suffit de réunir entr'elles les extrémités libres des résistances additionnelles des trois wattmètres.

Il est possible de combiner les trois instruments en un seul, en superposant les bobines mobiles le long d'un axe commun et en les soumettant respectivement à l'action des bobines fixes correspondantes.

Quand les phases sont également chargées, on peut se contenter d'un seul wattmètre, dont la bobine fixe reste dans l'un des fils d'alimentation, tandis que la bobine mobile et sa résistance additionnelle sont dérivées successivement entre

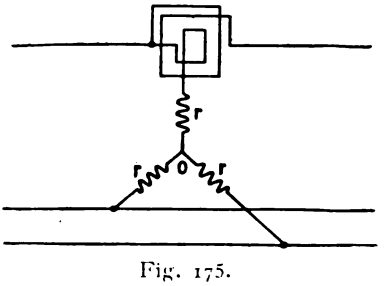


Fig. 175.

ce fil et chacun des deux autres. On évite le changement de connexions en créant un point neutre artificiel o, fig. 175, auquel aboutissent le circuit dérivé du wattmètre ainsi que

deux résistances r égales à la résistance de ce circuit et attachées, d'autre part, aux deux conducteurs de ligne non utilisés.

L'application de l'équation (8) ne demande que deux wattmètres reliés à des parties du système étudié toujours accessibles. La fig. 176 montre les liaisons dans l'hypothèse de circuits triphasés A, B et C connectés en triangle. On remarquera qu'elles sont les mêmes que pour la mesure de la puissance dans deux circuits diphasés M et N à retour commun. Avec les courants triphasés, si l'on n'a qu'un wattmètre à sa disposition, on peut intercaler la bobine fixe successivement dans deux quelconques des fils d'alimentation, tandis que la

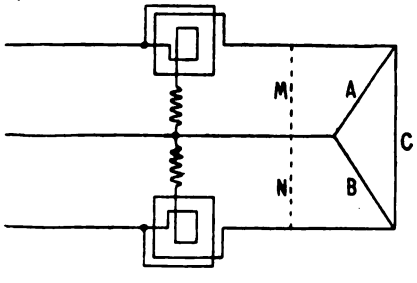


Fig. 176.

bobine mobile est disposée successivement entre chacun de ces deux fils et le troisième.

Il est à noter que les deux termes du second membre de l'équation (8) prennent des signes contraires dans le cas de déphasages considérables, tels que ceux des moteurs asynchrones tournant à vide. Il faut alors faire la différence des indications des deux wattmètres, qui accusent des déviations de sens opposés. Dans un wattmètre double, les actions des enroulements fixes sur les bobines mobiles s'ajoutent ou se retranchent comme il convient. Aussi, cette dernière disposition est-elle utilisée pour les compteurs.

En vue de rendre compte de l'interversion signalée, considérons un moteur enroulé en étoile [1], fig. 177. Les valeurs

[1] *Bull. de l'Ass. des Ing. electr. sortis de l'Institut Montefiore.* Vol. 1894-95, p. 249. — Gauthier-Villars, Paris.

maxima des différences de potentiel entre les points A, B, C et O sont représentées graphiquement, fig. 178, par les vecteurs OV_A, OV_B, OV_C décalés de 120°, et celles des courants dans les trois branches de l'étoile par les vecteurs OI_A, OI_B, OI_C. Les amplitudes des différences de potentiel $V_A - V_C$ et $V_B - V_C$ s'obtiennent en changeant le sens du vecteur OV_C et en traçant les résultantes OM et ON.

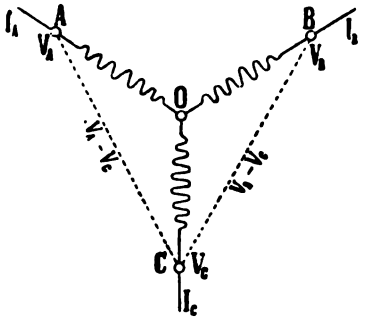


Fig. 177.

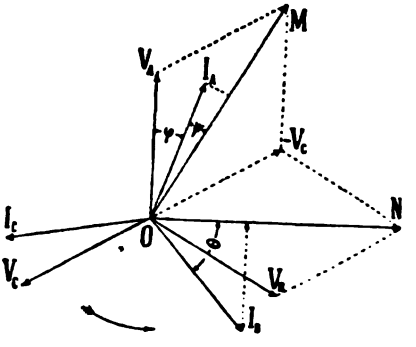


Fig. 178.

Le wattmètre dont la bobine fixe est traversée par le courant I_A et dont le circuit dérivé est soumis à la tension $V_A - V_C$ donne l'intégrale

$$\frac{1}{T}\int_0^T (V_A - V_C) \sin at \; I_A \sin (at + \psi)\, dt = \frac{1}{2} (V_A - V_C)\, I_A \cos \psi.$$

Le wattmètre correspondant au courant I_B et à la tension $V_B - V_C$ mesure l'intégrale

$$\frac{1}{T}\int_0^T (V_B - V_C) \sin \left(at - \frac{\pi}{3}\right) I_B \sin \left(at - \frac{\pi}{3} - \psi\right) dt = \frac{1}{2} (V_B - V_C)\, I_B \cos \psi.$$

Il est aisé de constater que, si le déphasage du courant sur la différence de potentiel dans chacune des phases du moteur vaut 60°, l'une des intégrales s'annule; s'il est supérieur à 60°, elle devient négative. L'angle de 60° représente un facteur de puissance égal à 0,5.

Dans la pratique, il n'est guère possible de se tromper, car les résultats sont manifestement inexacts si l'on commet l'erreur de signe. En faisant les deux observations avec un même wattmètre, si l'on a soin de transporter les connexions symétriquement d'une des positions à l'autre, le sens de déviation de la bobine mobile change dans le cas où les signes des deux intégrales sont différents. Un inverseur introduit dans le circuit dérivé de l'appareil permettra d'effectuer les lectures dans toutes les circonstances.

Avec les hautes tensions alternatives, les résistances additionnelles à insérer à la suite des bobines à fil fin des wattmètres deviennent coûteuses. On a songé à raccorder les bobines à des transformateurs réducteurs semblables à ceux des voltmètres. Si ces auxiliaires sont peu chargés, leur tension secondaire est sensiblement opposée à la tension primaire. Toutefois, la disposition en question ne peut convenir que pour des instruments de tableau, dont la précision est restreinte.

Wattmètres spéciaux. Modèles Siemens et Halske, Kelvin, Sumpner, à induction. — Le wattmètre Siemens et Halske à lecture directe donne des déviations proportionnelles aux puissances mesurées et pratiquement indépendantes de la fréquence et de la forme des courants alternatifs, fig. 179.

Le cadre fixe de l'instrument est combiné de manière à créer, dans la région où se meut la bobine mobile, un champ magnétique sensiblement radial, analogue à celui des galvanomètres Deprez et d'Arsonval. A cet effet, le côté supérieur et le côté inférieur des spires de son enroulement sont constitués par des circonférences auxquelles les côtés rectilignes latéraux aboutissent suivant les extrémités d'un diamètre, de telle sorte que le courant principal traverse les circonférences en se dérivant entre leurs moitiés en parallèle. Ces circonférences et les branches qui les raccordent sont découpées dans une tôle en cuivre de 0,3 mm d'épaisseur et ont une largeur de 14 mm. Les bandes métalliques sont pourvues de rainures destinées à empêcher la formation de courants de Foucault. L'enroulement comporte 32 spires séparées par des épaisseurs de papier du Japon im-

prégné d'un vernis isolant et groupées différemment en série ou en parallèle suivant l'intensité maxima des courants à transmettre. Quand toutes les spires sont reliées en série, l'enroulement mesure 0,037 4 ohm à 17° C, présente un coefficient de self-induction négligeable de 0,000 056 henry et peut supporter 12,5 ampères. Le courant peut atteindre 400 ampères avec toutes les spires connectées en dérivation.

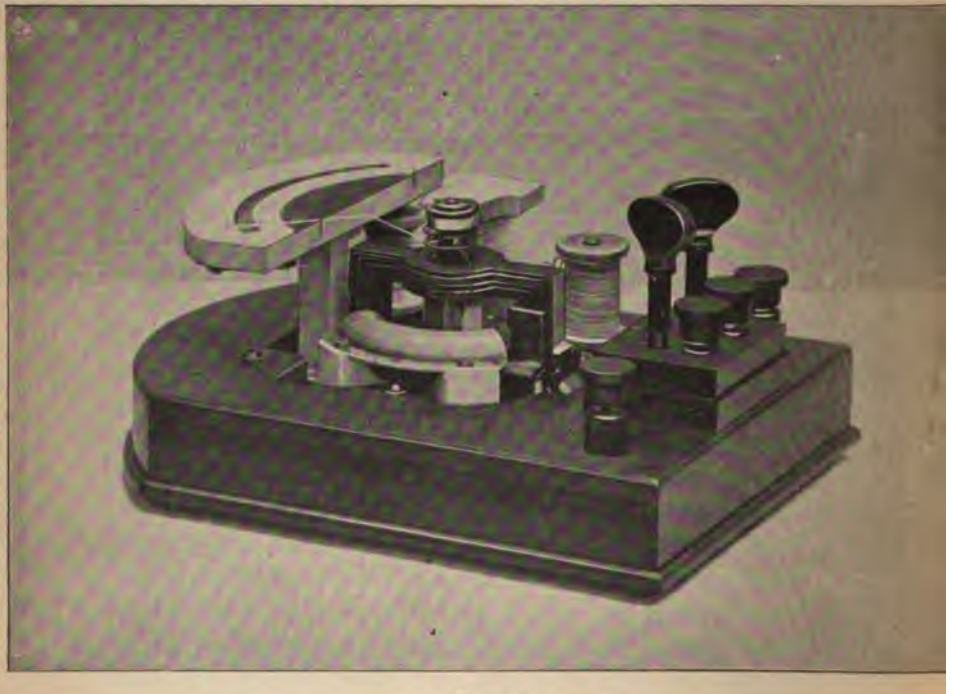


Fig. 179.

La bobine mobile comporte 400 spires de fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre. Sa résistance vaut 100 ohms et son coefficient de self-induction 0,008 8 henry. Elle est montée entre pointes, dirigée par deux ressorts spiraux enroulés en sens inverses et pourvue d'un amortisseur à air constitué par un disque à bords élargis coulissant dans un tube courbe fermé à l'un des bouts. En vue d'éliminer l'influence de la température

et de l'inductance de la bobine mobile, ainsi que pour obtenir une constante de proportionnalité convenable, l'enroulement à fil fin est muni d'un shunt et d'un rhéostat en série, tous deux en manganine et enroulés en double, qui portent la résistance de l'ensemble à 1 000 ohms. Dans ces conditions, une différence de potentiel de 30 volts peut être appliquée au système. Pour les voltages supérieurs, on ajoute en tension des résistances supplémentaires non-inductives en manganine, à raison de 1 000 ohms par 30 volts, de manière à maintenir l'intensité du courant dérivé du wattmètre inférieure à 0,03 ampère.

La position relative de la bobine mobile et du cadre fixe changeant avec la puissance à évaluer, il importe que le coefficient d'induction mutuelle des deux enroulements reste négligeable dans toutes les positions. D'une valeur de 0,000 16 henry quand l'index de l'instrument est au zéro de la graduation, ce coefficient descend à 0,000 02 henry quand l'aiguille marque 90°, pour remonter jusqu'à 0,000 15 henry pour la déviation maxima de 150°.

Lord Kelvin a imaginé un wattmètre de tableau à lecture directe, où le conducteur en série est un gros fil, courbé en forme de S dont les deux boucles embrassent chacune une bobine à fil fin. Les deux bobines enroulées en sens inverses constituent un système astatique soustrait aux influences extérieures et sont fixées à un axe commun portant l'aiguille indicatrice.

M. Sumpner a cherché à introduire les électro-aimants dans la construction des wattmètres pour courants alternatifs, en vue d'accroître la sensibilité de ces instruments. Dans un de ses modèles, le circuit dérivé constitue l'enroulement fortement inductif et peu résistant d'un noyau magnétique feuilleté, entre les pôles duquel pivote une bobine rappelée par des ressorts directeurs et reliée au secondaire de grande résistance d'un transformateur sans fer, dont le primaire est intercalé en série dans l'installation à contrôler. Les courants dans les deux parties de l'appareil, approximativement en quadrature respectivement avec la différence de potentiel agissante et avec le courant de service, conservent entr'eux sensiblement le même

déphasage que ces éléments. Gradué avec du courant continu, un tel wattmètre reste proportionnel pour les courants alternatifs; toutefois, la valeur de sa constante varie légèrement avec le facteur de puissance.

On transforme les appareils à induction décrits au chap. XI en wattmètres convenant aux circuits où le déphasage est faible en excitant deux des pôles inducteurs par des bobines ampèremétriques, les deux pôles situés dans la direction perpendiculaire étant pourvus de bobines voltmétriques avec self-induction additionnelle destinée à réaliser une différence de phase d'environ 90° entre les courants dans les deux couples d'enroulements. S'il existe un déphasage notable dans l'installation à essayer, ces instruments peuvent donner des erreurs considérables. Il faut donc les étalonner dans leurs conditions d'emploi.

Il est possible d'obtenir un courant exactement en quadrature avec la différence de potentiel de service dans les bobines dérivées, destinées à créer un champ tournant avec les bobines en série, en shuntant les premières par une résistance non-inductive convenable et en mettant à la suite de l'ensemble une bobine à réaction appropriée. On peut aussi avoir des déphasages déterminés par la combinaison de capacités et de self-inductions, mais les condensateurs sont peu recommandables parce qu'ils se détériorent sous l'action prolongée des courants alternatifs.

Méthode de MM. Ayrton et Sumpner. — Voici une méthode qui permet de déterminer, à l'aide de trois voltmètres et d'un ampèremètre pour courants alternatifs, la puissance consommée dans une résistance R à réactance. On dispose en série avec R une résistance sans réactance r, composée par exemple de lampes à incandescence.

Soient v_1 la différence de potentiel instantanée aux bornes de R et v_2 la différence de potentiel aux extrémités de r au même instant. La chute de tension totale occasionnée par l'ensemble de R et r est, au moment considéré,

$$v = v_1 + v_2. \quad (1)$$

Si i est l'intensité correspondante du courant, la puissance à mesurer vaut, à l'instant considéré,

$$p = v_1 i = v_1 \frac{v_2}{r}.$$

Mais de (1) on tire

$$v_1 v_2 = \frac{1}{2}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right);$$

d'où

$$p = \frac{1}{2r}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right).$$

La puissance moyenne absorbée est

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{2rT}\left(\int_0^T v^2\,dt - \int_0^T v_1^2\,dt - \int_0^T v_2^2\,dt\right)$$

$$= \frac{1}{2r}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right), \qquad (2)$$

en désignant par V, V_1 et V_2 les valeurs efficaces des différences de potentiel.

Si l'on ne connaît pas r, il suffit de relever l'intensité efficace I du courant à l'aide d'un électrodynamomètre. On a, en remarquant que $I = V_2/r$,

$$P = \frac{I}{2V_2}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right).$$

Quand le régime de fonctionnement est constant, les trois lectures peuvent être faites à l'aide du même voltmètre. Dans le cas où

$$V^2 = \frac{\alpha}{k}, \qquad V_1^2 = \frac{\alpha_1}{k}, \qquad V_2^2 = \frac{\alpha_2}{k},$$

α, α_1, α_2 étant les déviations de l'appareil, il vient alors

$$P = \frac{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}{2kr}.$$

Des erreurs de lecture $d\alpha = -d\alpha_1 = -d\alpha_2$ entraînent sur la valeur de P une erreur limite

$$dP = \frac{3\,d\alpha}{2kr},$$

de sorte que

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\,d\alpha}{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}.$$

Pour trouver les meilleures conditions d'expérience, supposons que α soit la plus grande déviation possible de l'index du voltmètre et cherchons le rapport $\alpha_1/\alpha_2 = n$ le plus favorable.

dP/P est minimum lorsque $\alpha_1 + \alpha_2$ est minimum. Or, V_1 et V_2 ayant pour résultante géométrique V, on peut écrire, pour un angle de phase φ,

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2\,V_1\,V_2\cos\varphi$$

ou

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + 2\sqrt{\alpha_1\,\alpha_2}\cos\varphi\,;$$

d'où l'on tire

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha - 2\sqrt{\alpha_1\,\alpha_2}\cos\varphi,$$

soit

$$\alpha_2\,(1 + n) = \alpha - 2\,\alpha_2\sqrt{n}\cos\varphi$$

et

$$\alpha_2 = \frac{\alpha}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Il s'ensuit que

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_2\,(1 + n) = \frac{\alpha\,(1 + n)}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Pour rendre cette quantité minima, il faut faire $n = 1$, c'est-à-dire $V_1 = V_2$.

Dans ces conditions,

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\,d\alpha}{\alpha - 2\,\alpha_2} = \frac{3\,(1 + \cos\varphi)}{\cos\varphi}\,\frac{d\alpha}{\alpha},$$

expression qui montre que l'erreur relative limite croît avec φ et qu'elle peut, par conséquent, acquérir une grande importance dans les mesures effectuées sur des transformateurs statiques fonctionnant à circuit ouvert.

Méthode de M. Fleming. — Pour que le procédé précédent soit applicable, il faut disposer d'une différence de potentiel presque double de celle qu'absorbe la résistance R à

réactance. Pour tourner cette difficulté, M. Fleming place la résistance sans réactance r en dérivation par rapport à R et mesure le courant efficace total I, ainsi que les courants efficaces I_1 et I_2 qui traversent respectivement R et r.

En raisonnant comme ci-dessus, on trouve

$$P = \frac{r}{2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right) = \frac{V}{2\,I_2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right).$$

L'erreur relative limite sur P est minima lorsque $I_2 = I_1$, ce qui entraîne la nécessité de disposer d'un courant efficace presque double de celui utilisé par le circuit soumis à l'essai.

Lorsque la différence de potentiel d'alimentation reste constante, les trois déterminations d'intensités peuvent être faites au moyen du même électrodynamomètre. Le montage de la fig. 180, dû à M. Behn-Eschenburg, permet d'effectuer rapide-

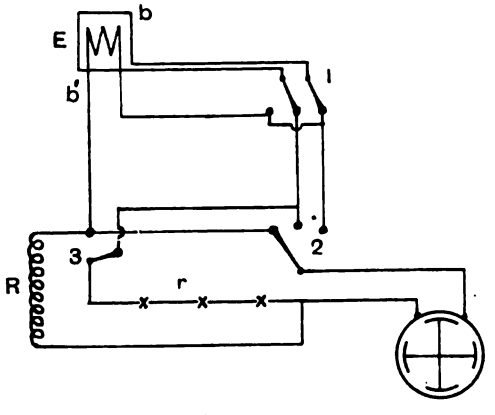


Fig. 180.

ment les observations. Il comprend trois commutateurs. Le commutateur 1 sert à intervertir le courant dans la bobine mobile de l'électrodynamomètre E, afin d'obtenir des déviations de sens convenable. Les connexions figurées se prêtent au relevé du courant I_2 passant dans la résistance sans réactance r. Cette résistance ayant été déterminée à chaud par des mesures préalables, on connaît ainsi la différence de potentiel efficace agissante. En amenant la manette du com-

mutateur 2 sur la touche médiane, on évalue le courant I_1 traversant R. Enfin, en reculant en outre la manette du commutateur 3 vers la gauche, on estime le courant total I.

On peut transformer l'électrodynamomètre en wattmètre en disposant la manette 2 sur la touche de droite et en tournant la manette 3 également vers la droite. Un courant est dérivé dans la bobine mobile *b* à travers *r* et la bobine fixe *b'* est mise en série avec R. La déviation de l'appareil mesure donc alors la puissance moyenne dépensée dans la résistance à réactance.

Le grand nombre de lectures que comportent les deux méthodes que nous venons d'étudier amène des erreurs multiples qui peuvent fausser considérablement les résultats en s'accumulant. De plus, par suite des irrégularités inévitables dans le fonctionnement des alternateurs, il convient ordinairement de faire simultanément les observations, ce qui exige trois ou quatre instruments de mesure et de nombreux opérateurs.

Wattmètre thermique Chauvin et Arnoux. — Un fil dilatable ABCD, attaché à deux blocs fixes A et D, passe sur une poulie portée par une lame flexible PE que tend un ressort à boudin, fig. 181. Toute différence d'allongement des brins AB et CD déplace la poulie et la déviation est amplifiée par un levier PQ, dont l'extrémité inférieure est fixée à un fil de soie QS tiré par un ressort plat ST et s'enroulant autour d'une poulie P' pourvue d'un index. Les variations de la température ambiante agissent également sur les deux brins et n'influencent pas ce dernier.

Supposons qu'on raccorde, au besoin par l'intermédiaire de résistances, les blocs A et D à un shunt *s* intercalé dans le circuit principal : les brins AB et CD seront parcourus par un courant dérivé ayant le sens des flèches 1. Si, d'autre part, on applique entre la poulie P et les blocs la différence de potentiel agissante, en ayant soin d'interposer une résistance additionnelle R, on provoque dans les deux brins des courants dérivés suivant les flèches 2. On voit que les courants s'ajoutent dans un des brins et se retranchent dans l'autre.

Vu que la déviation δ de l'index est proportionnelle à la différence des allongements des brins et que ces allongements sont proportionnels au carré des courants résultants à travers ceux-ci, on peut écrire, en remarquant qu'il y a proportionnalité entre l'intensité de la dérivation 1 et le courant de service i, ainsi qu'entre celle des dérivations 2 et la tension de service v,

$$\delta = k\,[\,(k'\,v + k''\,i)^2 - (k'\,v - k''\,i)^2] = 4\,k\,k'\,k''\,v\,i.$$

Dans le cas de courants alternatifs, on a

$$\delta = 4\,k\,k'\,k''\,\frac{1}{T}\int_0^T v\,i\,dt = 4\,k\,k'\,k''\,V\,I\cos\varphi.$$

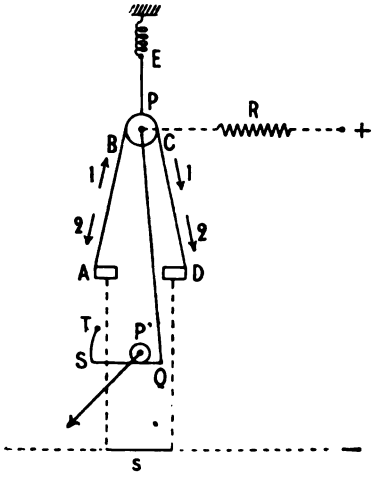


Fig. 181.

Le rôle de la résistance R, qui doit être dépourvue de réactance, peut alors aussi être rempli par un transformateur réducteur.

L'appareil présente des graduations supplémentaires pour la mesure des tensions et des courants. On l'emploie comme voltmètre en soumettant, par l'intermédiaire de la résistance additionnelle, un des brins à la différence de potentiel cherchée. On l'utilise comme ampèremètre en raccordant un brin au shunt.

Connaissant VI cos φ, V et I, on peut calculer le facteur de puissance cos φ.

Avec les wattmètres thermiques, de même qu'avec certains des instruments précédemment décrits, qui absorbent une puissance appréciable, il est souvent nécessaire de tenir compte de celle-ci.

Méthodes électrométriques. — M. Potier a montré que l'électromètre à quadrants peut servir à évaluer la puissance dépensée dans un conducteur R dont les extrémités sont à des potentiels v_1 et v_2.

Plaçons à la suite de R une résistance r, dont les potentiels extrêmes seront v_2 et v'. Relions les deux paires de quadrants respectivement aux points de potentiels v_1 et v_2, tandis que la palette communique avec le point de potentiel v'. Comme on l'a vu au chap. X, la déviation α de l'électromètre doit satisfaire à la relation

$$\alpha = k\,(v_2 - v_1)\left(v' - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Faisons une seconde expérience en connectant la palette au point de potentiel v_2. Il vient, en désignant la nouvelle déviation par α',

$$\alpha' = k\,(v_2 - v_1)\left(v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Par suite,

$$\frac{\alpha - \alpha'}{k} = (v_2 - v_1)\,(v' - v_2)$$

et, puisque la chute de tension $v' - v_2$ dans r est proportionnelle au courant, la différence des deux lectures donne la mesure de la puissance absorbée par R.

En multipliant la dernière équation par dt/T et en intégrant ses deux membres entre les limites o et T d'une période, on voit que, si la réactance de r est nulle, la conclusion susdite est applicable à la puissance moyenne des courants alternatifs, quelle que soit la forme de ceux-ci.

Nous avons fait abstraction ci-dessus des couples perturba-

teurs. La capacité de l'électromètre expose à des erreurs avec les hautes fréquences qui donnent lieu à des courants de charge nullement négligeables.

MM. Blondlot et Curie ont réduit les deux opérations successives à une seule par l'emploi d'un électromètre spécial, fig. 182,

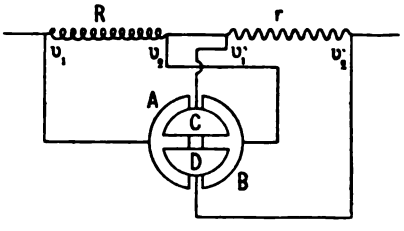


Fig. 182.

qui élimine les influences nuisibles grâce à la symétrie des pièces constituantes.

Deux demi-tambours fixes A et B agissent sur deux demi-cercles mobiles C et D, isolés l'un de l'autre et soutenus par une suspension bifilaire métallique. Supposons A et B reliés aux extrémités du conducteur R, dont les potentiels sont v_1 et v_2, tandis que, par l'intermédiaire des fils de support, C et D sont amenés aux potentiels v'_1 et v'_2 des bouts de la résistance r sans réactance.

Si la déviation est assez petite, on peut admettre que les couples résultant des attractions exercées par les parties fixes sur les parties mobiles sont simplement proportionnels au carré des différences de potentiel correspondantes, de sorte qu'on obtient pour l'équation d'équilibre, en désignant par $c\alpha$ le moment directeur de torsion,

$$c\alpha = k\,[(v_1 - v'_2)^2 - (v_1 - v'_1)^2 + (v_2 - v'_1)^2 - (v_2 - v'_2)^2]$$
$$= 2\,k\,(v_1 - v_2)\,(v'_1 - v'_2).$$

Connaissant VI cos φ, V et I, on peut calculer le facteur de puissance cos φ.

Avec les wattmètres thermiques, de même qu'avec certains des instruments précédemment décrits, qui absorbent une puissance appréciable, il est souvent nécessaire de tenir compte de celle-ci.

Méthodes électrométriques. — M. Potier a montré que l'électromètre à quadrants peut servir à évaluer la puissance dépensée dans un conducteur R dont les extrémités sont à des potentiels v_1 et v_2.

Plaçons à la suite de R une résistance r, dont les potentiels extrêmes seront v_2 et v'. Relions les deux paires de quadrants respectivement aux points de potentiels v_1 et v_2, tandis que la palette communique avec le point de potentiel v'. Comme on l'a vu au chap. X, la déviation α de l'électromètre doit satisfaire à la relation

$$\alpha = k\,(v_2 - v_1)\left(v' - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Faisons une seconde expérience en connectant la palette au point de potentiel v_2. Il vient, en désignant la nouvelle déviation par α',

$$\alpha' = k\,(v_2 - v_1)\left(v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Par suite,

$$\frac{\alpha - \alpha'}{k} = (v_2 - v_1)\,(v' - v_2)$$

et, puisque la chute de tension $v' - v_2$ dans r est proportionnelle au courant, la différence des deux lectures donne la mesure de la puissance absorbée par R.

En multipliant la dernière équation par dt/T et en intégrant ses deux membres entre les limites o et T d'une période, on voit que, si la réactance de r est nulle, la conclusion susdite est applicable à la puissance moyenne des courants alternatifs, quelle que soit la forme de ceux-ci.

Nous avons fait abstraction ci-dessus des couples perturba-

teurs. La capacité de l'électromètre expose à des erreurs avec les hautes fréquences qui donnent lieu à des courants de charge nullement négligeables.

MM. Blondlot et Curie ont réduit les deux opérations successives à une seule par l'emploi d'un électromètre spécial, fig. 182,

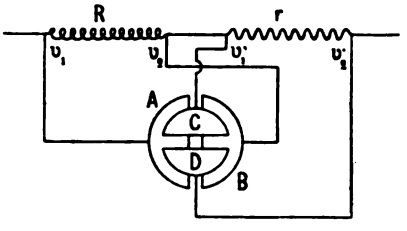


Fig. 182.

qui élimine les influences nuisibles grâce à la symétrie des pièces constituantes.

Deux demi-tambours fixes A et B agissent sur deux demi-cercles mobiles C et D, isolés l'un de l'autre et soutenus par une suspension bifilaire métallique. Supposons A et B reliés aux extrémités du conducteur R, dont les potentiels sont v_1 et v_2, tandis que, par l'intermédiaire des fils de support, C et D sont amenés aux potentiels v'_1 et v'_2 des bouts de la résistance r sans réactance.

Si la déviation est assez petite, on peut admettre que les couples résultant des attractions exercées par les parties fixes sur les parties mobiles sont simplement proportionnels au carré des différences de potentiel correspondantes, de sorte qu'on obtient pour l'équation d'équilibre, en désignant par $c\alpha$ le moment directeur de torsion,

$$c\alpha = k\,[(v_1 - v'_2)^2 - (v_1 - v'_1)^2 + (v_2 - v'_1)^2 - (v_2 - v'_2)^2]$$
$$= 2\,k\,(v_1 - v_2)\,(v'_1 - v'_2).$$

Connaissant VI cos φ, V et I, on peut calculer le facteur de puissance cos φ.

Avec les wattmètres thermiques, de même qu'avec certains des instruments précédemment décrits, qui absorbent une puissance appréciable, il est souvent nécessaire de tenir compte de celle-ci.

Méthodes électrométriques. — M. Potier a montré que l'électromètre à quadrants peut servir à évaluer la puissance dépensée dans un conducteur R dont les extrémités sont à des potentiels v_1 et v_2.

Plaçons à la suite de R une résistance r, dont les potentiels extrêmes seront v_2 et v'. Relions les deux paires de quadrants respectivement aux points de potentiels v_1 et v_2, tandis que la palette communique avec le point de potentiel v'. Comme on l'a vu au chap. X, la déviation α de l'électromètre doit satisfaire à la relation

$$\alpha = k\,(v_2 - v_1)\left(v' - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Faisons une seconde expérience en connectant la palette au point de potentiel v_2. Il vient, en désignant la nouvelle déviation par α',

$$\alpha' = k\,(v_2 - v_1)\left(v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Par suite,

$$\frac{\alpha - \alpha'}{k} = (v_2 - v_1)\,(v' - v_2)$$

et, puisque la chute de tension $v' - v_2$ dans r est proportionnelle au courant, la différence des deux lectures donne la mesure de la puissance absorbée par R.

En multipliant la dernière équation par dt/T et en intégrant ses deux membres entre les limites o et T d'une période, on voit que, si la réactance de r est nulle, la conclusion susdite est applicable à la puissance moyenne des courants alternatifs, quelle que soit la forme de ceux-ci.

Nous avons fait abstraction ci-dessus des couples perturba-

teurs. La capacité de l'électromètre expose à des erreurs avec les hautes fréquences qui donnent lieu à des courants de charge nullement négligeables.

MM. Blondlot et Curie ont réduit les deux opérations successives à une seule par l'emploi d'un électromètre spécial, fig. 182,

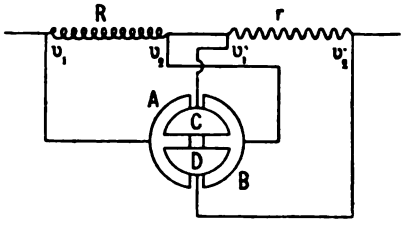


Fig. 182.

qui élimine les influences nuisibles grâce à la symétrie des pièces constituantes.

Deux demi-tambours fixes A et B agissent sur deux demi-cercles mobiles C et D, isolés l'un de l'autre et soutenus par une suspension bifilaire métallique. Supposons A et B reliés aux extrémités du conducteur R, dont les potentiels sont v_1 et v_2, tandis que, par l'intermédiaire des fils de support, C et D sont amenés aux potentiels v'_1 et v'_2 des bouts de la résistance r sans réactance.

Si la déviation est assez petite, on peut admettre que les couples résultant des attractions exercées par les parties fixes sur les parties mobiles sont simplement proportionnels au carré des différences de potentiel correspondantes, de sorte qu'on obtient pour l'équation d'équilibre, en désignant par $c\alpha$ le moment directeur de torsion,

$$c\alpha = k\,[(v_1 - v'_2)^2 - (v_1 - v'_1)^2 + (v_2 - v'_1)^2 - (v_2 - v'_2)^2]$$
$$= 2\,k\,(v_1 - v_2)\,(v'_1 - v'_2).$$

Connaissant VI cos φ, V et I, on peut calculer le facteur de puissance cos φ.

Avec les wattmètres thermiques, de même qu'avec certains des instruments précédemment décrits, qui absorbent une puissance appréciable, il est souvent nécessaire de tenir compte de celle-ci.

Méthodes électrométriques. — M. Potier a montré que l'électromètre à quadrants peut servir à évaluer la puissance dépensée dans un conducteur R dont les extrémités sont à des potentiels v_1 et v_2.

Plaçons à la suite de R une résistance r, dont les potentiels extrêmes seront v_2 et v'. Relions les deux paires de quadrants respectivement aux points de potentiels v_1 et v_2, tandis que la palette communique avec le point de potentiel v'. Comme on l'a vu au chap. X, la déviation α de l'électromètre doit satisfaire à la relation

$$\alpha = k\,(v_2 - v_1)\left(v' - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Faisons une seconde expérience en connectant la palette au point de potentiel v_2. Il vient, en désignant la nouvelle déviation par α',

$$\alpha' = k\,(v_2 - v_1)\left(v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Par suite,

$$\frac{\alpha - \alpha'}{k} = (v_2 - v_1)\,(v' - v_2)$$

et, puisque la chute de tension $v' - v_2$ dans r est proportionnelle au courant, la différence des deux lectures donne la mesure de la puissance absorbée par R.

En multipliant la dernière équation par dt/T et en intégrant ses deux membres entre les limites o et T d'une période, on voit que, si la réactance de r est nulle, la conclusion susdite est applicable à la puissance moyenne des courants alternatifs, quelle que soit la forme de ceux-ci.

Nous avons fait abstraction ci-dessus des couples perturba-

teurs. La capacité de l'électromètre expose à des erreurs avec les hautes fréquences qui donnent lieu à des courants de charge nullement négligeables.

MM. Blondlot et Curie ont réduit les deux opérations successives à une seule par l'emploi d'un électromètre spécial, fig. 182,

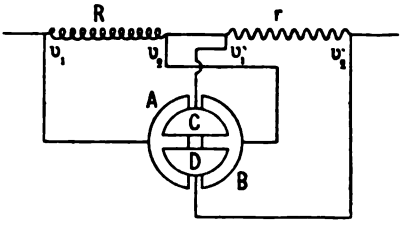


Fig. 182.

qui élimine les influences nuisibles grâce à la symétrie des pièces constituantes.

Deux demi-tambours fixes A et B agissent sur deux demi-cercles mobiles C et D, isolés l'un de l'autre et soutenus par une suspension bifilaire métallique. Supposons A et B reliés aux extrémités du conducteur R, dont les potentiels sont v_1 et v_2, tandis que, par l'intermédiaire des fils de support, C et D sont amenés aux potentiels v'_1 et v'_2 des bouts de la résistance r sans réactance.

Si la déviation est assez petite, on peut admettre que les couples résultant des attractions exercées par les parties fixes sur les parties mobiles sont simplement proportionnels au carré des différences de potentiel correspondantes, de sorte qu'on obtient pour l'équation d'équilibre, en désignant par $c\alpha$ le moment directeur de torsion,

$$c\alpha = k\,[(v_1 - v'_2)^2 - (v_1 - v'_1)^2 + (v_2 - v'_1)^2 - (v_2 - v'_2)^2]$$
$$= 2\,k\,(v_1 - v_2)\,(v'_1 - v'_2).$$

Chapitre XV.

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et joulemètres. — Dans les distribu électriques, la redevance doit être calculée d'après l'ér utilisée.

Dans la plupart des réseaux à courant continu, la di tion s'effectue sous une tension sensiblement consta l'énergie disponible est proportionnelle à la quantité d' cité fournie. Il suffit alors d'installer un appareil qui t cette quantité pour obtenir une base de taxation conv Dans ces conditions, les compteurs peuvent donc se à des mesureurs de quantité d'électricité ou *coulombm*

Dans certaines installations électriques on se content de simples *compteurs de temps*, dont le totalisateur, d lors de l'établissement du courant, enregistre un nom portionnel à la durée de fermeture du circuit. Un tel peut convenir lorsque la puissance utilisée demeure in

Dans les distributions par courants alternatifs, où l de la réactance à la résistance des récepteurs e le déphasage du courant change également. Il s'e l'expression de la puissance moyenne, qui des courants sinusoïd

shunt et
r, r'. La
nelle est
millième
r' est de
de l'élec-
lu cuivre
nce de la
le sulfate
à incan-

nent. La
e dégage
mois, un
sine pour
ndant ce
ité fournie
s manipu-
a constaté
e de polari-

magnétiques, qui y déterminent des courants de Foucault plus ou moins intenses suivant la position relative de la pièce et des aimants. La puissance absorbée par les courants de Foucault croît comme le carré de la vitesse angulaire, de sorte que le couple résistant correspondant est proportionnel à celle-ci. Le freinage électromagnétique s'affaiblit quand la résistance électrique de la pièce conductrice augmente avec la température ambiante. Aussi convient-il d'employer une substance à faible coefficient de température ou de compenser l'effet signalé par une modification corrélative du couple moteur.

Dans une distribution à trois conducteurs par courant continu ou par courants alternatifs simples ou diphasés, il faut sommer l'énergie des deux circuits. On utilisera dans ce but un compteur distinct pour chacun de ceux-ci. On peut aussi employer un compteur double, dont les deux parties agissent dans le même sens sur le totalisateur.

Avec les courants triphasés, il faudrait trois joulemètres ordinaires ou un appareil triple pour relever l'énergie électrique d'après les formules (6) et (7) des pages 343 et 344. Si la charge est également répartie entre les trois circuits, comme c'est le cas pour les moteurs, un joulemètre simple raccordé à l'un d'eux peut suffire. Quand la charge est irrégulièrement distribuée, il est possible de réduire le nombre des joulemètres à deux en adoptant le montage indiqué dans la fig. 176 et correspondant à la formule (8), qui convient à la fois aux circuits en étoile et aux circuits en triangle. Les deux appareils sont généralement combinés en un seul comportant deux bobines fixes qui sollicitent deux bobines mobiles actionnant le même totalisateur.

Coulombmètre Edison. — Dans l'hypothèse d'un courant continu, le voltamètre est tout indiqué comme coulombmètre, puisque le dépôt électrolytique est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé l'appareil.

M. Edison a utilisé l'électrolyse du sulfate de zinc entre des électrodes de zinc, fig. 183. Afin d'éviter l'introduction d'une résistance trop considérable dans le circuit à contrôler, le courant alimentant les récepteurs traverse une bande de maille-

chort R. Deux voltamètres V, V' sont dérivés sur ce shunt et chacun d'eux est en série avec une bobine de cuivre r, r'. La résistance d'un voltamètre et de sa bobine additionnelle est calculée de telle manière que l'électrolyte reçoive la millième partie du courant de service. Le but des bobines r, r' est de compenser les modifications que subit la résistance de l'électrolyte lorsque la température change : la résistivité du cuivre varie en sens inverse de celle du liquide sous l'influence de la chaleur. Afin d'empêcher la congélation de la solution de sulfate de zinc, une bilame B ferme le circuit d'une lampe à incan-

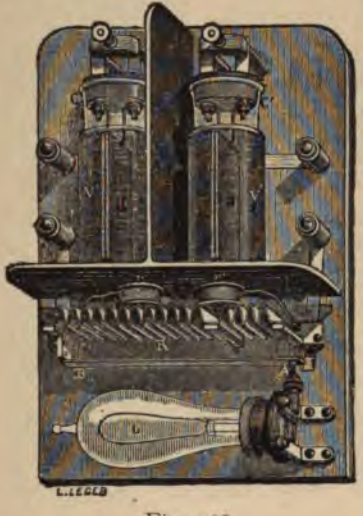


Fig. 183.

descence L quand la température baisse trop fortement. La lampe reste allumée jusqu'à ce que la chaleur qu'elle dégage ramène la bilame dans sa position normale. Chaque mois, un contrôleur retire un des voltamètres, qu'il porte à l'usine pour vérifier l'accroissement de poids de la cathode ; pendant ce temps, l'autre voltamètre totalise la quantité d'électricité fournie à l'abonné. Ce compteur est peu coûteux, mais les manipulations qu'il entraîne l'ont fait abandonner. On a constaté pratiquement l'existence d'une force électromotrice de polari-

Connaissant VI cos φ, V et I, on peut calculer le facteur de puissance cos φ.

Avec les wattmètres thermiques, de même qu'avec certains des instruments précédemment décrits, qui absorbent une puissance appréciable, il est souvent nécessaire de tenir compte de celle-ci.

Méthodes électrométriques. — M. Potier a montré que l'électromètre à quadrants peut servir à évaluer la puissance dépensée dans un conducteur R dont les extrémités sont à des potentiels v_1 et v_2.

Plaçons à la suite de R une résistance r, dont les potentiels extrêmes seront v_2 et v'. Relions les deux paires de quadrants respectivement aux points de potentiels v_1 et v_2, tandis que la palette communique avec le point de potentiel v'. Comme on l'a vu au chap. X, la déviation α de l'électromètre doit satisfaire à la relation

$$\alpha = k\,(v_2 - v_1)\left(v' - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Faisons une seconde expérience en connectant la palette au point de potentiel v_2. Il vient, en désignant la nouvelle déviation par α',

$$\alpha' = k\,(v_2 - v_1)\left(v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}\right).$$

Par suite,

$$\frac{\alpha - \alpha'}{k} = (v_2 - v_1)\,(v' - v_2)$$

et, puisque la chute de tension $v' - v_2$ dans r est proportionnelle au courant, la différence des deux lectures donne la mesure de la puissance absorbée par R.

En multipliant la dernière équation par dt/T et en intégrant ses deux membres entre les limites o et T d'une période, on voit que, si la réactance de r est nulle, la conclusion susdite est applicable à la puissance moyenne des courants alternatifs, quelle que soit la forme de ceux-ci.

Nous avons fait abstraction ci-dessus des couples perturba-

teurs. La capacité de l'électromètre expose à des erreurs avec les hautes fréquences qui donnent lieu à des courants de charge nullement négligeables.

MM. Blondlot et Curie ont réduit les deux opérations successives à une seule par l'emploi d'un électromètre spécial, fig. 182,

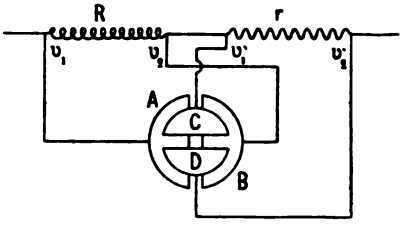


Fig. 182.

qui élimine les influences nuisibles grâce à la symétrie des pièces constituantes.

Deux demi-tambours fixes A et B agissent sur deux demi-cercles mobiles C et D, isolés l'un de l'autre et soutenus par une suspension bifilaire métallique. Supposons A et B reliés aux extrémités du conducteur R, dont les potentiels sont v_1 et v_2, tandis que, par l'intermédiaire des fils de support, C et D sont amenés aux potentiels v'_1 et v'_2 des bouts de la résistance r sans réactance.

Si la déviation est assez petite, on peut admettre que les couples résultant des attractions exercées par les parties fixes sur les parties mobiles sont simplement proportionnels au carré des différences de potentiel correspondantes, de sorte qu'on obtient pour l'équation d'équilibre, en désignant par $c\alpha$ le moment directeur de torsion,

$$c\alpha = k\,[(v_1 - v'_2)^2 - (v_1 - v'_1)^2 + (v_2 - v'_1)^2 - (v_2 - v'_2)^2]$$
$$= 2\,k\,(v_1 - v_2)\,(v'_1 - v'_2).$$

Chapitre XV.

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et joulemètres. — Dans les distributions électriques, la redevance doit être calculée d'après l'énergie utilisée.

Dans la plupart des réseaux à courant continu, la distribution s'effectue sous une tension sensiblement constante et l'énergie disponible est proportionnelle à la quantité d'électricité fournie. Il suffit alors d'installer un appareil qui totalise cette quantité pour obtenir une base de taxation convenable. Dans ces conditions, les compteurs peuvent donc se réduire à des mesureurs de quantité d'électricité ou *coulombmètres*.

Dans certaines installations électriques on se contente même de simples *compteurs de temps*, dont le totalisateur, déclanché lors de l'établissement du courant, enregistre un nombre proportionnel à la durée de fermeture du circuit. Un tel appareil peut convenir lorsque la puissance utilisée demeure invariable.

Dans les distributions par courants alternatifs, où le rapport de la réactance à la résistance des récepteurs est variable, le déphasage du courant change également. Il s'ensuit, d'après l'expression de la puissance moyenne, qui est $V I \cos \varphi$ avec des courants sinusoïdaux, que, pour une différence de potentiel

à i. Lorsque n_2 diffère assez peu de n_1 pour que le facteur $n_2 + n_1$ puisse être considéré comme constant, c'est-à-dire quand l'action électromagnétique est très faible vis-à-vis de celle de la pesanteur, on a donc $(n_2 - n_1)\, dt = k\, i\, dt$, de sorte que la différence des oscillations totalisées du pendule est proportionnelle à la quantité d'électricité transmise.

M. Aron a imaginé une disposition ingénieuse pour enregistrer cette différence avec exactitude. Le compteur contient deux horloges identiques, l'une pourvue d'un balancier ordinaire et l'autre d'un balancier magnétique, fig. 187. Les méca-

Fig. 187.

nismes de ces horloges sont reliés par un train d'engrenages différentiels, qui totalise les écarts de vitesse des deux mouvements sur une série de cadrans. Les changements de température, agissant également sur les deux balanciers, n'influencent pas sensiblement le coulombmètre. On voit, dans un coin de la boîte, un fil à plomb servant à mettre l'appareil de niveau. Les indications de l'instrument dépendent de la permanence du magnétisme du balancier de droite. Un courant intense, dû par exemple à un court-circuit momentané dans l'installation, suffit parfois pour modifier profondément l'aimantation. De plus, il est assez facile de frauder, en plaçant un aimant

dans le voisinage du compteur de manière à annuler l'effet du courant.

Lorsqu'il s'agit d'enregistrer l'énergie absorbée par un circuit à courant continu ou de desservir une distribution à courants alternatifs, on adopte une combinaison qui tient du wattmètre, fig. 188. Dans une bobine fixe, formée de gros fil et parcourue par le courant de service, oscille une bobine de fil fin, supportée par l'un des balanciers à l'aide d'un étrier et reliée aux extrémités du circuit à contrôler.. La variation d'allure des deux mouvements d'horlogerie est alors proportionnelle à

Fig. 188.

l'action électrodynamique des enroulements, c'est-à-dire à la puissance électrique consommée.

Dans le modèle de joulemètre Aron le plus récent, fig. 189, les deux balanciers, qui ont été raccourcis pour multiplier les oscillations et accroître ainsi la sensibilité, sont terminés chacun par une bobine dérivée sur les conducteurs alimentant l'installation. Les bobines fixes sont traversées par le courant d'utilisation en sens contraires, de manière à déterminer une accélération d'un côté et un ralentissement de l'autre. La minuterie est entraînée proportionnellement à la différence des nombres de battements des deux pendules. Comme il est

impossible d'arriver au synchronisme parfait des balanciers à vide, M. Aron a eu l'idée d'intervertir périodiquement le sens du courant dans les deux bobines mobiles, ce qui compense les erreurs dues à cette cause. Les influences magnétiques extérieures sont également neutralisées. Chaque déplacement

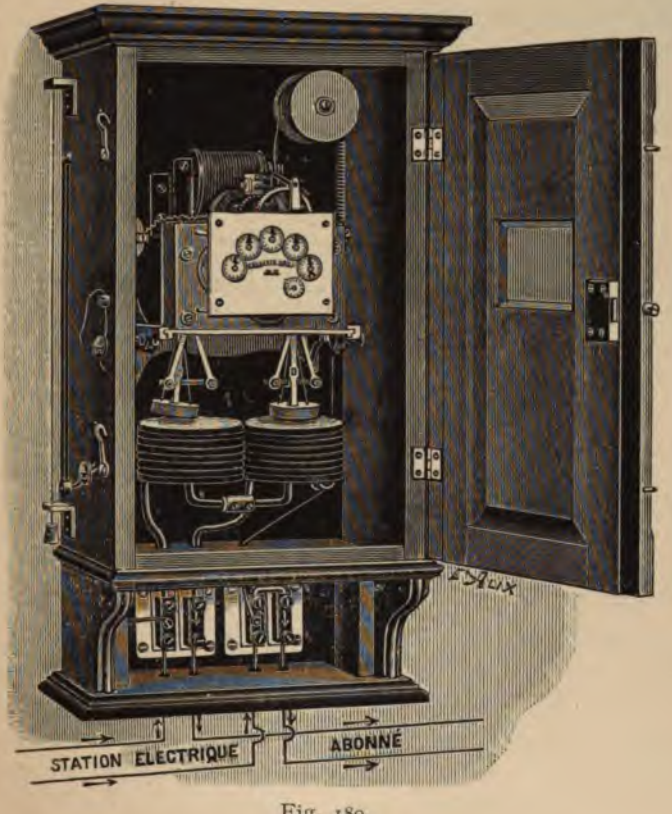


Fig. 189.

de l'inverseur provoque le remontage automatique des ressorts des mécanismes d'horlogerie.

Quand il s'agit d'une distribution à trois conducteurs par courant continu, chacune des deux bobines fixes est intercalée dans un des conducteurs extrêmes et la bobine mobile correspondante est branchée sur le pont comprenant ce conducteur.

Pour les distributions triphasées, on effectue les liaisons comme il a été indiqué plus haut. Des renversements périodiques des courants dérivés se produisent également dans ces cas.

On peut ranger parmi les compteurs oscillants le joulemètre A. E. G., dans lequel des butoirs limitent la course de la bobine mobile d'un wattmètre, dont la vitesse de déplacement est réglée par un disque conducteur pivotant entre des aimants. Quand cette bobine arrive à fond de course dans un sens, un relais y intervertit le courant, ce qui permet une excursion en sens opposé. Les oscillations résultantes sont enregistrées par un totalisateur à chiffres sauteurs.

Joulemètres-moteurs. Système E. Thomson. Système Vulcain. — On doit à M. E. Thomson un joulemètre à intégration continue, convenant également aux courants continus et aux courants alternatifs, fig. 190. Deux bobines de gros fil,

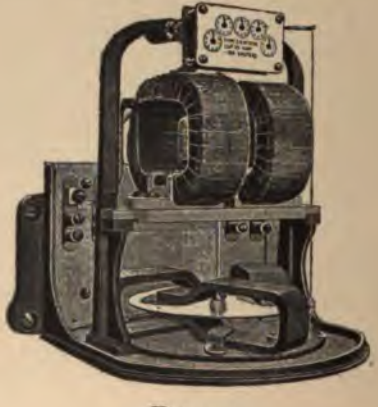


Fig. 190.

traversées par le courant de service, jouent le rôle d'inducteur pour un enroulement mobile en fil fin, auquel on ajoute en série une résistance sans self-induction et qu'on dérive avec ce rhéostat additionnel sur le circuit d'utilisation. Un collecteur, analogue à celui de Gramme, mais à lames et ressorts frotteurs en argent, est disposé sur l'axe de rotation vertical de l'enrou-

lement induit, qui tourne sous l'influence d'un couple électrodynamique proportionnel à la puissance consommée et équilibré, en régime de vitesse, par la réaction des courants de Foucault développés dans un disque en cuivre entraîné entre les pôles d'aimants permanents. Le système constitue en somme un moteur électrique dont le travail est absorbé, sous forme de chaleur, par un frein électromagnétique. Le moment retardateur étant proportionnel au carré du flux des aimants, ceux-ci doivent être très constants. Il faut qu'ils soient suffisamment puissants pour maintenir une allure modérée restreignant l'usure du pivot, qui porte sur une crapaudine en saphir. En vue de compenser les résistances passives, l'inducteur est muni d'une bobine supplémentaire en fil fin, mise en tension avec l'induit, parcourue par le courant dérivé et produisant un couple un peu inférieur à celui des frottements, de telle sorte que le compteur ne parte pas à vide sous l'influence des vibrations. Le nombre de révolutions de l'armature dépourvue de fer est enregistré par les index des cadrans supérieurs.

Le joulemètre Vulcain est un compteur-moteur du même genre, présentant diverses modifications intéressantes. L'induit du moteur est maintenu par des saphirs montés sur des ressorts à boudin, qui s'opposent à un serrage excessif des pointes et réduisent les frottements. Le frein électromagnétique est constitué par un cylindre tournant dans une couronne d'aimants dont la hauteur peut être réglée de manière que les indications de l'appareil soient conformes à la constante inscrite.

L'instrument représenté par la fig. 191 est destiné à une distribution à trois fils. Les deux bobines fixes doivent être intercalées dans les conducteurs de ligne extrêmes et la bobine mobile, munie de sa résistance additionnelle, est à dériver sur ces conducteurs, le fil neutre n'étant pas raccordé au compteur.

Dans les appareils ci-dessus les frottements des balais augmentent progressivement sous l'influence des petites étincelles de commutation et il faut nettoyer le collecteur de temps en temps. Il convient que ce nettoyage, de même que le rac-

cordement et la vérification des pivots puissent se faire sans ouvrir la boîte de protection plombée.

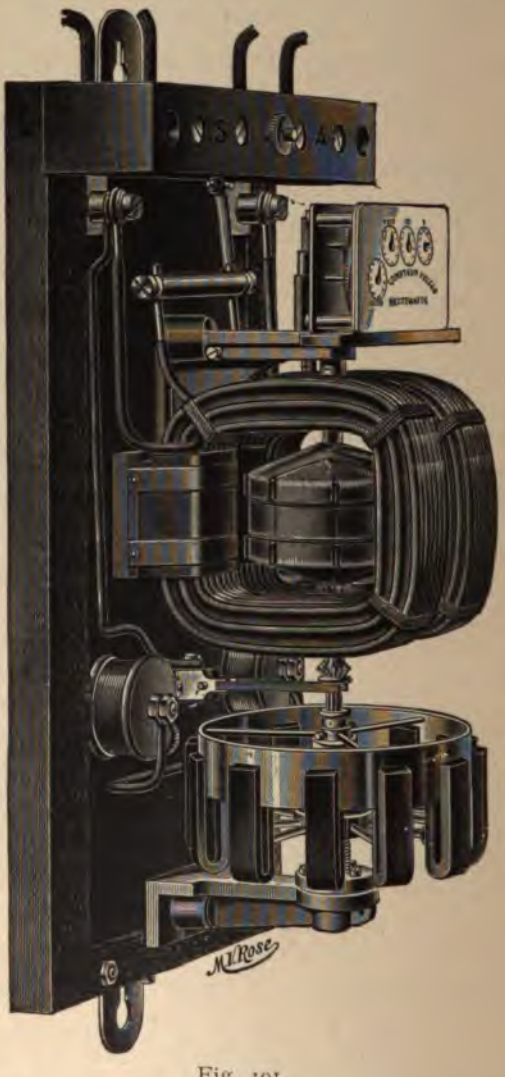


Fig. 191.

M. Frager a montré qu'on peut corriger l'effet pernicieux de la self-induction du circuit dérivé des joulemètres-moteurs

employés dans les distributions à courants alternatifs, soit en mettant une spire de l'enroulement fixe en court-circuit, soit en shuntant cet enroulement par une résistance non inductive.

On tare les joulemètres-moteurs en déterminant l'énergie correspondant à un nombre donné de tours de celle des pièces dont la vitesse de rotation est la plus grande. L'examen du système d'engrenages reliant cette pièce au totalisateur fait connaître le nombre de tours de la première que représente une division du cadran des unités. Ainsi, dans certains compteurs E. Thomson, il faut 100 révolutions de l'induit du moteur pour faire avancer l'aiguille des unités d'une division. La constante est alors égale au nombre de watts-heures correspondant à ce nombre de tours.

Joulemètres à induction. Systèmes Ferraris, Blathy, Stanley et Westinghouse. — Il existe un certain nombre de joulemètres basés sur les propriétés des champs tournants, sur les répulsions par les courants alternatifs ou sur des effets analogues dus aux réactions de courants induits. Ces appareils ont le mérite de la simplicité, mais leurs indications ne sont pas indépendantes de la forme et de la fréquence des courants, comme celles des compteurs utilisant le principe du wattmètre.

Le compteur Ferraris, fig. 192, comprend un anneau en fer *a* présentant quatre pôles saillants intérieurs, dont deux, *f f*, sont excités par le courant de service et les deux autres, *e e*, par un courant dérivé à travers un circuit de réactance suffisante pour être déphasé d'environ 90° sur la tension utile. L'ensemble des bobines produit un champ magnétique tournant, concentré par un cylindre de fer fixe *c*, autour duquel un tambour en aluminium *b* pivote sur un axe *d*. Un amortisseur à aimants développe le couple antagoniste. Le nombre de révolutions du tambour entraîné par le champ est totalisé sur des cadrans. Cet appareil doit être étalonné pour la fréquence particulière de l'installation à contrôler. Dans les circuits à courants triphasés où la charge est inégalement répartie, on fait usage de deux compteurs semblables dont les bobines à gros fil sont insérées dans deux des conducteurs d'alimenta-

tion et les bobines à fil fin dérivées entre ceux-ci et le troisième conducteur.

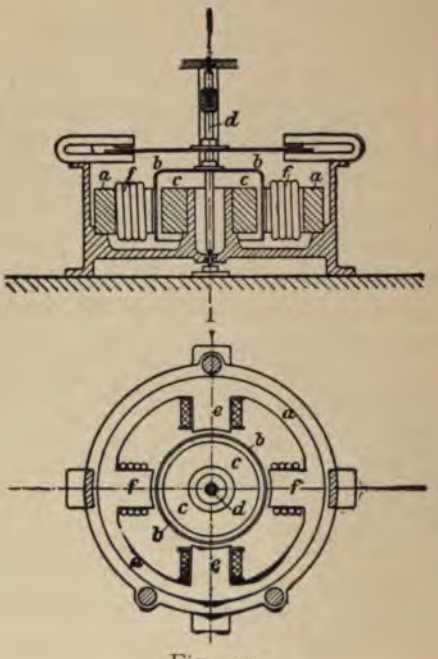


Fig. 192.

Dans le joulemètre Blathy, un disque en aluminium se meut sous l'action résultante de deux champs alternatifs produits l'un par un électro-aimant que traverse le courant fourni aux récepteurs et l'autre par un électro-aimant dérivé sur ceux-ci directement ou par l'intermédiaire d'un transformateur réducteur. Les deux électro-aimants embrassent les bords du disque en deux endroits écartés angulairement de 90°. Un aimant permanent, entourant le disque dans une autre région de son pourtour, engendre des courants amortisseurs. Le totalisateur porté par l'axe du disque est établi de façon qu'une division du cadran des unités corresponde à un hectowatt-heure.

Le disque mobile du compteur Stanley est soumis à l'influence d'un électro-aimant à courants alternatifs agissant dissymétriquement de manière à déterminer une répulsion

résultante ; l'amortissement est obtenu par l'action d'aimants permanents sur le disque.

Dans le joulemètre Westinghouse, fig. 193, un plateau D en aluminium, subissant la force retardatrice développée par un aimant permanent A qui en embrasse le bord, pivote entre les pôles d'un électro-aimant N à noyau laminé, dont la bobine B_1 présente une grande self-induction et est dérivée sur le circuit où l'on veut mesurer l'énergie, tandis qu'une autre bobine B_2 est disposée en série avec ce circuit. Le courant dans la bobine B_1, de même que le flux magnétique produit par celle-ci, est sensiblement en quadrature avec la différence de potentiel agissante $V_0 \sin at$ et peut s'écrire sous la forme $-(V_0/z) \cos at$.

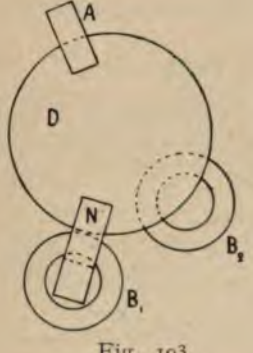


Fig. 193.

D'autre part, le courant qui parcourt la bobine B_2 est déphasé sur la tension susdite d'un angle φ dépendant des conditions du circuit à contrôler. Soit $I_0 \sin (at \pm \varphi)$ ce courant, qui induit dans le plateau, dont la self-induction est négligeable, des courants tels que $-I'_0 \cos (at \pm \varphi) = -A\, I_0 \cos (at \pm \varphi)$. La réaction électromagnétique du flux de B_1 sur ces courants induits développe un couple moteur variant comme le produit $V_0\, I_0 \cos at \cos (at \pm \varphi)$ et dont le moment moyen est par conséquent proportionnel à $\frac{1}{2} V_0 I_0 \cos \varphi$, c'est-à-dire à la puissance moyenne à totaliser.

Compteurs à intégration discontinue. — Le joulemètre Frager, qui rentre dans cette catégorie, comporte trois parties

distinctes : 1) un wattmètre, dont la déviation est proportionnelle à la puissance utilisée ; 2) un mécanisme communiquant une rotation lente et continue à une came, qui rencontre l'aiguille du wattmètre pendant un temps variant avec la grandeur de la déviation ; 3) un totalisateur à cadrans, mis en mouvement pendant la durée du contact de la came avec l'aiguille. Il résulte de cette combinaison que les cadrans enregistrent des nombres croissant comme la somme des produits de la puissance par le temps, c'est-à-dire comme l'énergie fournie. Cet appareil peut obéir à des courants très faibles; il ne présente pas de frottements comme les instruments à mobiles tournants.

La maison Siemens et Halske construit un modèle de compteur reposant sur le même principe.

Compteurs à double tarification. — Un moyen d'engager les consommateurs à diminuer leur demande d'énergie électrique aux moments de forte charge de l'usine génératrice consiste en une tarification différente aux heures du jour et du soir.

Ce résultat peut être atteint en faisant usage de deux compteurs, mis en service à des heures convenables par un mécanisme spécial commandé de l'usine.

MM. Brown et Routin n'utilisent qu'un seul compteur dans le même but. Dans cet appareil à enregistrement intermittent, des signaux, donnés par une horloge de la station centrale et transmis par des courants alternatifs quand il s'agit d'une distribution à courant continu ou inversement, font avancer le totalisateur plus rapidement pendant la soirée que pendant la journée.

Une autre solution du problème a été indiquée par M. Meller, qui fait en sorte que le compteur, du type moteur par exemple, marque différemment sous l'influence du courant d'éclairage et du courant pour usages industriels. A cet effet, il suffit de faire passer les deux espèces de courants dans des nombres inégaux de spires de la bobine ampèremétrique du joulemètre, de façon que les effets sur la bobine voltmétrique soient proportionnés aux prix correspondants de vente de l'énergie.

Dans certains cas, on a approprié des compteurs électriques au système de tarification à paiement préalable, un mécanisme fermant le circuit d'utilisation pendant un temps donné par l'effet du poids d'une pièce de monnaie.

Parfois les compteurs sont pourvus d'un dispositif enregistrant l'intensité maxima du courant utilisé, en vue de répondre à certains modes de tarification basés sur cet élément (1). C'est dans un but analogue que M. Aron ajoute à ses joulemètres oscillants une aiguille pivotante, poussée en avant par un butoir qu'entraîne la minuterie reliant les pendules et qu'un ressort de rappel ramène toutes les dix minutes à sa position initiale : l'énergie maxima consommée en une période de la durée susdite est ainsi renseignée par la déviation permanente de l'aiguille, qui ne participe pas au mouvement de retour du butoir.

Limites d'erreurs des compteurs. — Il existe dans les divers pays des laboratoires officiels ou privés où s'opère la vérification des compteurs. Les lois obligent parfois les sociétés qui distribuent l'énergie électrique à soumettre les compteurs utilisés à l'homologation dans des établissements reconnus. Les appareils ainsi agréés doivent en outre être contrôlés, sinon périodiquement, du moins quand leur fonctionnement prête à des doutes.

Voici, à titre de renseignement, les prescriptions édictées à cet égard dans quelques pays.

Autriche. Les compteurs doivent démarrer franchement avec 3 pour 100 de la charge maxima, si celle-ci correspond à une intensité de courant ne dépassant pas 3 ampères, et avec 2 pour 100 dans le cas contraire. Les écarts entre les indications des compteurs et les valeurs qu'ils devraient enregistrer ne peuvent pas excéder $\pm$ 0,04 de ces dernières, pour les régimes compris entre 10 et 100 pour 100 de la charge maxima.

---

(1) Éric Gerard ; *Leçons sur l'Électricité.* 7e édition, t. II. — Gauthier-Villars, Paris.

Avec les compteurs à courants alternatifs, la condition précédente s'applique à des déphasages moindres que 45°.

Belgique. Le texte suivant est extrait d'un règlement proposé en Belgique.

Les appareils de tarification seront munis d'enveloppes pouvant être scellées à l'aide de plombs et établies de manière à empêcher tout réglage après fermeture. Les bornes de ces appareils seront disposées de façon qu'il ne soit pas nécessaire, lors de la mise en station, de détacher les plombs de fermeture. Les circuits d'intensité et de tension pourront être rendus indépendants. Les dispositifs d'accès à certains organes, dont le nettoyage et l'entretien sont périodiquement nécessaires à la marche régulière des appareils de tarification, seront tolérés, pour autant qu'ils ne permettent pas de fausser les indications de ces appareils.

Chaque appareil de tarification devra porter, soit sur le cadran, soit sur une plaque de métal soudée à l'enveloppe, les indications suivantes : *a*) le nom ou la marque du fabricant ou du vendeur et le numéro d'ordre de fabrication de l'appareil de tarification ; *b*) la nature du courant qu'admet l'appareil de tarification (continu, alternatif simple, triphasé, etc), le mode de distribution, l'intensité maxima, le voltage, ainsi que le nombre de périodes par seconde s'il s'agit de courants alternatifs ; *c*) l'unité à laquelle se rapportent les indications du totalisateur.

L'écart entre la consommation indiquée par un appareil de tarification et la consommation réelle ne dépassera pas : aux charges de 100 pour 100 et de 50 pour 100 de la charge maxima de l'appareil de tarification, ± 0,04 de la consommation réelle ; à la charge de 10 pour 100, ± 0,05 de la consommation réelle. Les écarts que présenteront les appareils de tarification pour courants alternatifs simples ou polyphasés, à mettre en service sur des circuits d'utilisation inductifs, ne dépasseront pas ± 0,05 et ± 0,06 des consommations réelles, sous le régime de l'intensité maxima et pour des angles de déphasage correspondant respectivement à des facteurs de puissance de 0,75 et de 0,5.

Le démarrage des compteurs-moteurs s'effectuera sous une charge inférieure à 2 pour 100 de la charge maxima, sans que la

charge d'essai appliquée puisse être inférieure à 25 watts. Les appareils de tarification d'autres systèmes commenceront à enregistrer les consommations sous une charge inférieure à 2 pour 100 de la charge maxima. Les consommations relevées aux divers systèmes d'appareils de tarification, quand le circuit d'intensité se trouvera interrompu, ne dépasseront pas 1/5000 de la consommation maxima.

Les mécanismes d'horlogerie des compteurs à tarifs combinés seront exacts à ± 1/1500 et les indicateurs de maxima à ± 0,05 entre les charges de 10 pour 100 et 100 pour 100 de la charge maxima.

Grande Bretagne. On admet que l'exactitude est suffisante quand l'erreur, à partir de 10 pour 100 de la pleine charge, ne dépasse pas ± 0,025 de la constante déclarée avec les compteurs de plus de 3 ampères, et ± 0,035 avec les autres. L'essai se fait à 20, 50 et 80 pour 100 de la pleine charge et l'on prend la moyenne des trois valeurs obtenues.

Essais des compteurs. — Indépendamment de la vérification de leur constante, c'est-à-dire du nombre par lequel il faut multiplier la différence des indications du totalisateur pour avoir la quantité d'électricité ou l'énergie électrique consommée dans l'intervalle entre les deux relevés, les compteurs doivent être soumis, avant leur agréation, à des essais ayant pour but de contrôler leur permanence et toutes les autres conditions nécessaires à une bonne marche.

Ces expériences porteront entr'autres sur l'influence des vibrations, qui modifient les frottements ; de l'air humide, qui rouille les pivots, oxyde les conducteurs et altère leurs enveloppes de coton ou de soie ; des champs magnétiques parasites, qui changent la constante ; des poussières, qui s'introduisent dans la boîte protectrice si celle-ci ne ferme pas hermétiquement.

Il faut aussi déterminer l'intensité du courant provoquant le démarrage, ainsi que la perte dans les bobines voltmétriques afin d'estimer le déchet qui en résulte pour la distribution électrique. L'effet des surcharges doit de même être étudié.

En ce qui concerne les compteurs à courants alternatifs, il convient de vérifier l'action des variations de la fréquence, de la forme des courants et du facteur de puissance. Dans le cas de courants polyphasés, on observera l'influence de charges inégales dans les diverses phases.

Pour ces expériences, on alimente généralement par des sources différentes les circuits d'intensité et de tension, qui doivent donc pouvoir être séparés. La mesure de la résistance de ces circuits à chaud permet de calculer l'effet Joule. L'accouplement direct de deux alternateurs à l'aide d'un manchon à calage variable donne le moyen d'essayer les compteurs à courants alternatifs dans des conditions variées de déphasage.

Les fils de connexion peuvent agir sur les compteurs quand les courants sont intenses. Il faut avoir soin de les disposer comme pour l'emploi et d'en noter la position sur le certificat délivré.

Le courant de démarrage doit être recherché lorsque le compteur est au repos et quand il est soumis à des vibrations obtenues, par exemple, en le frappant avec un maillet garni de caoutchouc. En aucun cas, l'instrument ne peut démarrer à vide, même avec une surtension de 10 pour 100. L'expérience se poursuit ordinairement pendant une heure, afin de mettre l'appareil dans les conditions de service courant.

Il en est de même des épreuves sous charges variées, qui, pour les compteurs à courant continu, s'effectuent le plus souvent successivement avec 1/5, 3/5 et 5/5 de la pleine charge, puis, en redescendant, avec 5/5, 3/5 et 1/5, de sorte que la charge maxima reste appliquée pendant deux heures. Les appareils de comparaison sont, dans ce cas, des ponts de compensation, des voltmètres et ampèremètres ou des wattmètres étalons.

Pour les compteurs à courants alternatifs, on se sert de wattmètres ou de balances électrodynamiques et on répète les essais aux différentes charges croissantes et décroissantes susdites avec des facteurs de puissance successivement égaux à 1, 0,6 et 0,2. On contrôle de plus l'influence de variations de fréquence atteignant $\pm$ 10 pour 100 de la valeur normale et,

quand il s'agit de compteurs pour installations polyphasées, on estime encore l'effet de répartitions inégales des charges entre les diverses phases.

Comme les aiguilles indicatrices des totalisateurs se meuvent souvent très lentement, surtout à faible charge, on a l'habitude, avec les compteurs-moteurs, d'observer le nombre de révolutions des induits ou disques plus rapides, en vérifiant au besoin si le rapport entre les vitesses angulaires de ceux-ci et des index correspond bien au renseignement donné par le constructeur. Dans les compteurs oscillants, il suffit en général de compter les battements pendant une vingtaine de minutes. Lorsqu'on étalonne simultanément une série de compteurs, on fait durer la mesure plus longtemps, en notant directement le déplacement des aiguilles des cadrans.

Les résultats obtenus dans les différents essais sont mis sous forme de diagrammes dans lesquels les abscisses figurent les charges et les ordonnées les pourcentages d'erreur en plus ou en moins. Comme pour les ampèremètres, voltmètres et wattmètres, les courbes des erreurs doivent toujours accompagner les instruments. Parfois on dresse, comme diagramme d'étalonnage, une courbe ayant pour abscisses les valeurs réelles, déduites des appareils étalons, et pour ordonnées les indications du compteur. Rigoureusement cette ligne devrait être une droite passant par l'origine des coordonnées et inclinée à 45° sur les axes; mais, par suite des frottements plus ou moins compensés, elle commence ordinairement au-dessus ou en-dessous de l'origine et affecte une forme plus ou moins irrégulière. Une telle courbe est d'un usage moins commode que le diagramme des erreurs défini plus haut.

Chapitre XVI.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASE.

Emploi des wattmètres. — 1) Le déphasage φ d'une différence de potentiel et du courant qu'elle entretient dans un conducteur à réactance est défini, dans l'hypothèse de grandeurs sinusoïdales, par le rapport entre les watts réels $VI\cos\varphi$ évalués à l'aide d'un wattmètre et les volts-ampères ou watts apparents représentés par le produit VI des valeurs efficaces de la différence de potentiel et du courant.

Pour déterminer le déphasage de deux courants, M. Blakesley utilise trois électrodynamomètres. L'un des courants traverse le premier appareil et l'une des bobines du deuxième; le second courant parcourt l'autre bobine de celui-ci et le troisième appareil. L'indication du deuxième instrument correspond à $II'\cos\varphi$, tandis que les deux autres électrodynamomètres donnent I et I'. On peut donc calculer $\cos\varphi$, d'où φ.

2) Si l'on substitue une grande self-induction à la résistance additionnelle sans réactance de la bobine dérivée d'un wattmètre, on peut faire en sorte que la déviation de l'appareil soit proportionnelle à $VI\sin\varphi$, c'est-à-dire dépende du courant déwatté et non du courant watté comme dans le cas ordinaire. Le sinus variant plus rapidement que le cosinus pour de petits

angles, cette modification est favorable à la précision des mesures quand il s'agit de déphasages faibles.

3) La méthode des deux wattmètres convenant à l'estimation de la puissance moyenne totale dans les circuits triphasés permet de trouver le facteur de puissance des trois phases, quand celles-ci sont également chargées. En effet, on voit dans la fig. 178 que $\psi = 30^\circ - \varphi$ et $\theta = 30^\circ + \varphi$. Si V est la différence de potentiel efficace entre les fils de ligne pris deux à deux et I le courant efficace dans chacun de ces conducteurs, l'un des wattmètres donne donc

$$W = VI \cos (30^\circ - \varphi)$$

et l'autre

$$W' = VI \cos (30^\circ + \varphi).$$

On déduit de là

$$\operatorname{tang} \varphi = \sqrt{3} \frac{W - W'}{W + W'}.$$

Méthode graphique de M. Janet. — Sur un tambour conducteur d'enregistreur on tend une feuille de papier imbibé d'une solution aqueuse de ferrocyanure potassique et d'azotate ammonique (parties égales des solutions saturées de ces sels et 6 parties d'eau). Si l'on appuie sur le papier un style d'acier à pointe un peu émoussée et si l'on fait passer un courant alternatif à travers le papier par l'intermédiaire du style, on observe, chaque fois que le potentiel de la pointe dépasse une certaine valeur positive, une trace bleue due à la décomposition du cyanure. En donnant au tambour un mouvement de rotation et en réglant convenablement la différence de potentiel efficace entre le style et le tambour, on obtient une succession de traits courts, dont le nombre permet de déduire la période du courant, si l'on connaît la vitesse angulaire du tambour.

Pour obtenir un enregistrement net, le papier, après avoir trempé pendant quelques heures dans le liquide, est tendu et séché imparfaitement avec un papier buvard, de manière à présenter un aspect mat. Après l'inscription, on le lave à grande eau.

L'appareil, offrant une forte résistance et pas de réactance,

peut être utilisé comme un voltmètre. Deux styles semblables permettent de déterminer le déphasage entre une différence de potentiel et le courant qu'elle produit dans un conducteur inductif. On met à la suite de ce dernier un conducteur sans réactance. En dérivant le tambour et les deux styles sur ces conducteurs, on obtient des traces correspondant aux maxima de la différence de potentiel et du courant.

Phasemètre Dobrowolsky. — Soient, fig. 194, deux bobines disposées à angle droit et traversées par des courants

$$i_1 = I_1 \sin at \quad \text{et} \quad i_2 = I_2 \sin (at - \varphi),$$

déphasés d'un angle φ. A l'intérieur de ces enroulements, plaçons un disque de fer, pivotant entre pointes et qu'un ressort spiral

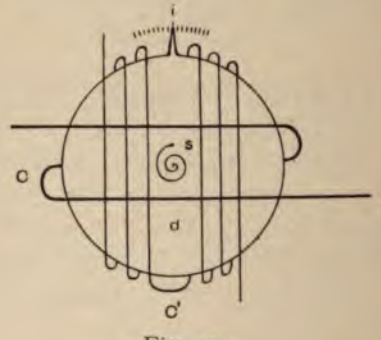


Fig. 194.

maintient dans une position de repos. Un index sert à repérer sur un cadran l'orientation que l'action des courants donne au disque.

Pour chercher le couple déviant qui sollicite le disque, considérons les forces électromotrices d'induction que i_1 et i_2 engendrent dans celui-ci. En appelant $\mathfrak{M}_1$ le coefficient d'induction mutuelle de la première bobine et du disque, on a, parallèlement aux spires de cet enroulement, une force électromotrice

$$e'_1 = - \mathfrak{M}_1 \frac{di_1}{dt} = - a \mathfrak{M}_1 I_1 \cos at.$$

Parallèlement aux spires du second enroulement, on a de même une force électromotrice

$$e'_2 = -\mathfrak{M}_2 \frac{di_2}{dt} = -a\,\mathfrak{M}_2\,I_2 \cos(at - \varphi).$$

Si r_1 et r_2 sont les résistances opposées à ces forces électromotrices par le disque, dont on peut négliger la self-induction, il se forme des courants induits

$$i'_1 = -\frac{a\mathfrak{M}_1 I_1}{r_1}\cos at \quad \text{et} \quad i'_2 = -\frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{r_2}\cos(at - \varphi).$$

Le courant i_1 ne réagit pas sur le courant i'_1 qui est dans son plan; mais il exerce sur le courant i'_2 un couple, dont le moment moyen est proportionnel à la valeur moyenne du produit $i_1 i'_2$, soit à

$$\frac{1}{2} I_1 \frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \quad \text{ou} \quad -\frac{1}{2} I_1 \frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{r_2} \sin\varphi.$$

Semblablement i_2, dont l'action est nulle sur i'_2, donne avec i'_1 un couple moyen proportionnel à

$$\frac{1}{2} I_2 \frac{a\mathfrak{M}_1 I_1}{r_1} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2} I_2 \frac{a\mathfrak{M}_1 I_1}{r_1} \sin\varphi.$$

Le couple dévian résultant, équilibré par la torsion du ressort directeur, et, par suite, la déviation du disque sont donc proportionnels à $\frac{1}{2} a\, I_1 I_2 \sin\varphi$.

Ce dispositif est spécialement approprié à la détermination de la composante dévattée du courant d'un alternateur. Dans ce but, l'une des bobines est parcourue par le courant efficace $I_2/\sqrt{2}$ de la machine, tandis que l'autre est mise en dérivation, avec une grande résistance sans self-induction, sur les bornes de celle-ci. Le courant efficace dérivé $I_1/\sqrt{2}$ étant proportionnel à la différence de potentiel efficace de l'alternateur, on a, si φ est le déphasage de cette tension sur le courant débité et α l'angle de déviation du disque,

$$\frac{I_2}{\sqrt{2}} \sin\varphi = \frac{\alpha}{k}.$$

L'appareil doit être gradué empiriquement pour une tension et une fréquence déterminées. Si, en même temps qu'on s'en sert, on mesure $I_2/\sqrt{2}$ avec un ampèremètre, on peut déduire $\sin\varphi$ des deux lectures.

Phasemètre Brüger [1]. — M. Brüger a imaginé une autre combinaison pour évaluer le déphasage d'un courant par rapport à une différence de potentiel, fig. 195.

Le courant considéré

$$i = I_0 \sin(at - \varphi)$$

passe dans deux bobines coaxiales A et B, entre lesquelles deux bobines C et D, calées à angle droit, pivotent sur pointes, un index repérant la position de cet équipage mobile. La

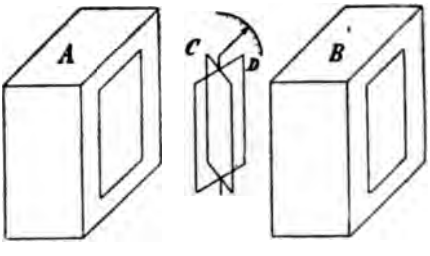


Fig. 195.

bobine C est mise en série avec une grande résistance non inductive et l'ensemble est soumis à la différence de potentiel en question, de sorte que cette bobine reçoit un courant

$$i' = \frac{V_0}{r} \sin at.$$

Grâce à une self-induction additionnelle convenable, la bobine D est traversée par un courant de même amplitude V_0/r et en retard d'un quart de période sur la différence de potentiel :

$$i'' = \frac{V_0}{r} \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right).$$

[1] FONTAINE : *Bull. de l'Ass. des Ing. électr. sortis de l'Institut Montefiore.* Vol. 1899-1900, p. 51.

Si α désigne l'angle de l'axe de C avec l'axe de A et B, le courant i envoie à travers C un flux

$$\mathcal{N}' = \mathcal{M}'_0 \, I_0 \sin (at - \varphi) \cos \alpha,$$

dont la réaction sur i' produit un couple moyen

$$\frac{V_0 \, \mathcal{M}'_0 \, I_0}{2 r} \sin \alpha \cos \varphi.$$

De même, le flux

$$\mathcal{N}'' = \mathcal{M}''_0 \, I_0 \sin (at - \varphi) \sin \alpha,$$

qui traverse D, développe avec i'' un couple moyen

$$\frac{V_0 \, \mathcal{M}''_0 \, I_0}{2 r} \cos \alpha \sin \varphi.$$

En s'arrangeant de manière à avoir des coefficients maxima d'induction mutuelle égaux, il vient, lorsque l'équipage mobile se tient en équilibre,

$$\sin \alpha \cos \varphi = \cos \alpha \sin \varphi,$$

soit

$$\alpha = \varphi.$$

Le déphasage cherché se lit ainsi directement sur la graduation.

Des dispositions analogues sont utilisées dans le phasemètre Arno et dans l'appareil Hartmann et Braun.

Chapitre XVII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

Coefficients de self-induction. — Le coefficient de self-induction $\mathcal{L}$ d'un circuit électrique de résistance r, dans lequel agit une force électromotrice e, est défini par l'équation

$$i = \frac{e - \frac{d(\mathcal{L}i)}{dt}}{r}.$$

Dans le cas où le circuit est dépourvu de fer, $\mathcal{L}$ est constant et l'expression de la force électromotrice de self-induction peut être mise sous la forme

$$- \mathcal{L}\frac{di}{dt}.$$

Quand, au contraire, l'on considère un électro-aimant, $\mathcal{L}$ est variable. En effet, si $\mathfrak{N}$ désigne le flux total embrassé,

$$\mathcal{L} = \frac{\mathfrak{N}}{i},$$

ce qui montre que le coefficient de self-induction est proportionnel à la perméabilité. Ainsi, pour un circuit magnétique

fermé, sans perte de flux, dont l'enroulement magnétisant continu comporte n spires en tout et n_1 spires par unité de longueur,

$$\mathcal{N} = n\mathcal{B}s = n\mu\mathcal{H}s = 4\pi n_1 i n \mu s$$

et

$$\mathcal{L} = 4\pi n_1 n \mu s. \qquad (1)$$

Toutes les méthodes qui permettent de mesurer la perméabilité magnétique conduisent, par conséquent, à la connaissance de $\mathcal{L}$. Ce coefficient changeant avec le courant de l'électro-aimant, il convient de chercher sa valeur pour l'intensité normale.

Si la forme de l'appareil ne se prête pas à l'évaluation de la perméabilité du noyau par l'un des procédés qui seront exposés dans un chapitre spécial, on peut déterminer $\mathcal{L}$ en estimant la quantité d'électricité que transporte l'extra-courant de l'enroulement, soit au moyen d'un galvanomètre balistique, soit d'après une méthode de zéro consistant à neutraliser cet extra-courant par celui d'une bobine étalon ou par la décharge d'un condensateur. On procèdera par renversement du courant, si l'on veut éviter l'erreur due au magnétisme rémanent du noyau.

Il est souvent difficile, dans les essais basés sur la mesure des extra-courants, d'adopter les courants de service des électro-aimants, sauf pour les petits appareils employés en télégraphie et en téléphonie. Même avec ceux-ci, la durée des extra-courants rend aléatoires les résultats fournis par le galvanomètre balistique, ainsi qu'on l'a fait ressortir dans l'étude de ce dernier. Quand il s'agit d'électro-aimants industriels, les praticiens se servent couramment de la méthode de Joubert ci-après décrite, qui donne une idée généralement suffisante de $\mathcal{L}$, si l'induction magnétique est inférieure à 5000 gauss.

M. Blondel a proposé de faire passer, dans les électro-aimants industriels, un courant rendu variable par le moyen d'un rhéostat et d'enregistrer, à l'aide d'un oscillographe

(1) Éric GERARD; *Leçons sur l'Électricité*. 7e édition, t. I, chap. XVI. — Gauthier-Villars, Paris.

jouant le rôle de voltmètre, la différence de potentiel v aux bornes de la bobine, pendant qu'un autre oscillographe, utilisé comme ampèremètre, enregistre l'intensité i. On voit par l'équation

$$v - ir = \frac{d(\mathcal{L}i)}{dt}$$

que, si l'on déduit de la courbe des tensions des ordonnées égales à ir, on obtient le diagramme représentant les variations de $d(\mathcal{L}i)/dt$ par rapport au temps. L'intégration de ce diagramme donne les valeurs de $\mathcal{L}i$ et, par suite, celles de $\mathcal{L}$.

Tandis que le coefficient de self-induction des bobines sans fer se détermine assez facilement à 0,01 près par les procédés ordinaires et à 0,001 près par les méthodes précises où l'on fait toutes les corrections voulues, les électro-aimants entraînent fréquemment des erreurs dépassant 0,05.

Méthode directe de Maxwell pour la comparaison d'un coefficient de self-induction à celui d'une bobine étalon. Emploi de commutateurs spéciaux, du téléphone et de courants alternatifs. — Nous avons décrit précédemment un étalon à self-induction variable, chap. IV. Un tel appareil permet de déterminer d'une manière rapide le coefficient de self-induction d'une bobine. A cet effet, il suffit de former un pont de Wheatstone au moyen de deux branches non inductives b et d, de la bobine à essayer c et de l'étalon a. On règle l'équilibre pour le régime permanent, puis, en ouvrant et en fermant successivement la clef de la pile, on modifie le calage de la bobine mobile de l'étalon jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro pendant le régime variable. On a alors la proportion

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} = \frac{\mathcal{L}_a}{\mathcal{L}_c},$$

qui résulte immédiatement des propriétés générales du pont établies plus haut, p. 323, si l'on pose $\mathcal{L}_b = \mathcal{L}_d = 0$.

MM. Ayrton et Perry ont imaginé un commutateur, dénommé *secohmètre*, qui permet d'accroître considérablement la sensi-

bilité de cette méthode, en accumulant sur le galvanomètre les impulsions dues à des ouvertures et fermetures répétées du circuit de la pile, fig. 196. Les communications du pont avec le galvanomètre et la pile sont établies par l'intermédiaire de frotteurs appuyant latéralement contre deux disques mobiles, composés de segments annulaires en cuivre. Les disques sont

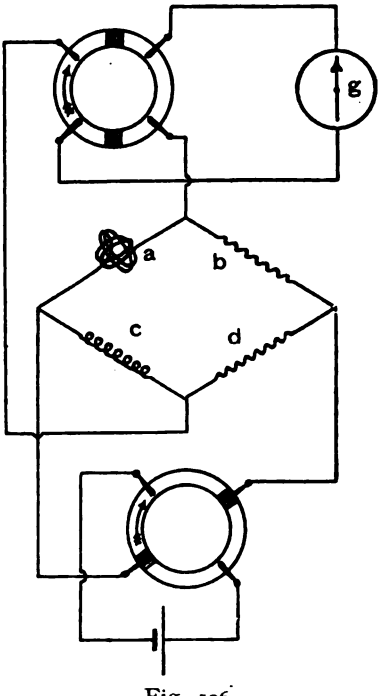


Fig. 196.

animés de mouvements rotatifs solidaires, qui ont pour effet d'ouvrir et de fermer alternativement le circuit de la pile, tandis que le galvanomètre est successivement raccordé au pont et mis en court-circuit. Les raccordements de l'instrument correspondent aux périodes variables d'ouverture et de fermeture, et les connexions sont interverties par le jeu du commutateur de telle sorte que les courants instantanés traversent le cadre multiplicateur dans un même sens. Grâce à ce procédé

cumulatif, qui n'est qu'une variante de la méthode de répétition de Gauss, un léger défaut d'équilibre s'accuse par une déviation sensible du galvanomètre.

Le modèle de secohmètre ci-dessus laisse parfois à désirer au point de vue des contacts. On y substitue avantageusement un commutateur cylindrique, fig. 197, mû à la main ou par un électromoteur et sur lequel les balais appuient comme dans les dynamos.

Il est essentiel, pour que ces auxiliaires ne conduisent pas à de grosses erreurs systématiques, que chaque période variable soit poussée jusqu'au régime permanent. S'il n'en est pas ainsi, une diminution de la vitesse du commutateur fait changer le

Fig. 197.

résultat. Le secohmètre ne peut pas être utilisé avec les électro-aimants, dont la période variable est trop longue.

La méthode de comparaison étudiée s'accommode au besoin d'un étalon de self-induction invariable, à la suite duquel on ajoute une résistance réglable ; mais il faut alors procéder à de longs tâtonnements pour trouver les valeurs de b et d satisfaisant à la fois à la condition $b/d = a/c$ du régime permanent et à la condition $b/d = \mathfrak{L}_a/\mathfrak{L}_c$ du régime variable.

Pour arriver à assurer l'immobilité du galvanomètre dans le régime permanent, il est nécessaire, comme dans plusieurs des méthodes suivantes, de ménager un rhéostat à curseur dans un côté du pont, afin de pouvoir en graduer exactement la résistance.

On est parfois obligé d'introduire dans deux des branches du pont, telles que a et b, des résistances additionnelles pour changer le rapport a/c. Il faut alors procéder de nouveau au réglage du régime permanent. Pour éviter ces tâtonnements, on peut faire $c = d$. Il suffit dans ce cas d'ajouter à a et b des résistances égales : l'équilibre permanent subsiste, quel que soit le rapport a/c.

On peut discuter la méthode en raisonnant comme à propos de la mesure des résistances. Si l'on calcule la valeur de b la plus favorable au point de vue de la sensibilité dans la période variable, il vient, en appelant ρ la résistance de la pile et n le rapport b/d,

$$b = \sqrt{\frac{g\,a\,n\,[a + \rho(n+1)]}{g\,n + a\,(n+1)}}. \quad \text{(M. Gray.)}$$

On ne doit pas s'attendre à obtenir, dans des esssis de ce genre, la même précision que dans l'évaluation des résistances, parce que les bobines du pont ont, en général, des self-inductions et des capacités qui ne sont pas négligeables.

La méthode en question peut être appliquée en remplaçant la pile par un générateur à courants alternatifs. L'instrument destiné à déceler l'équilibre est alors un téléphone ou un appareil électrodynamique, qui peut consister en un galvanomètre Deprez et d'Arsonval dont l'inducteur est un électro-aimant à noyau feuilleté excité par le générateur. On a aussi fait usage de galvanomètres ordinaires à période courte et réglable sur celle des courants. Un tel détecteur, après avoir servi à établir l'équilibre dans le régime permanent, oscille autour du zéro de l'échelle tant que l'équilibre n'est pas atteint dans le régime variable. Quand il se produit un déréglage accidentel des résistances, dû par exemple à l'échauffement par effet Joule au cours de l'expérience, on en est averti parce que les oscillations s'effectuent autour d'une certaine déviation moyenne différente de zéro.

Lorsqu'on a recours à un récepteur téléphonique pour la comparaison de self-inductions faibles, il convient d'utiliser des courants périodiques de fréquence élevée. Un vibrateur

microphonique, actionné par un mécanisme trembleur dont le ressort a une période de vibration très courte, répond au but.

Méthodes indirectes. Méthode de Lord Rayleigh pour mesurer un coefficient de self-induction en fonction d'une résistance. — La bobine d, dont le coefficient de self-induction cherché est $\mathcal{L}$, est disposée dans le quatrième côté d'un pont de Wheatstone, dont les trois autres côtés a, b et c sont formés de conducteurs sans réactance, fig. 198.

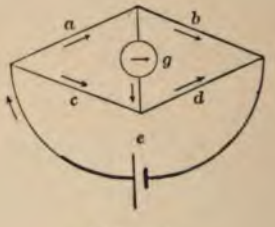


Fig. 198.

On règle d'abord les côtés pour le régime permanent, de la manière ordinaire.

Quand on ferme ensuite la diagonale du galvanomètre avant celle de la pile, la réaction de self-induction de la bobine d détermine une élongation ; lors de l'ouverture de la diagonale de la pile, il se produit une élongation égale et de sens contraire. C'est ordinairement par rupture du courant qu'on procède avec les bobines sans noyau. Dans le cas d'enroulements avec fer, il faudrait renverser le sens du courant pour éviter l'erreur due au magnétisme rémanent, mais la durée prolongée de la période variable ne permettrait alors qu'une approximation grossière.

Si I_d désigne le courant permanent dans la branche d, la quantité d'électricité transportée par l'extra-courant d'ouverture est

$$Q = \frac{\mathcal{L} I_d}{d + b + \frac{g(a+c)}{g+a+c}}$$

et la fraction dérivée dans le galvanomètre vaut

$$q = \frac{\mathfrak{L}\, I_d}{d + b + \dfrac{g(a+c)}{g+a+c}} \frac{a+c}{g+a+c} = \frac{\alpha}{K},$$

α représentant l'élongation et K la constante balistique du galvanomètre suivi, dans l'hypothèse d'un appareil à aimant fixe, d'une grande résistance en vue d'éliminer la correction pour l'amortissement.

Enfin, on détruit l'équilibre permanent du pont en ajoutant à d une petite résistance r, ce qui occasionne une déviation δ du galvanomètre. Dans ces conditions, le courant i qui traverse celui-ci est le même que si une force électromotrice $r\, I'_d$ agissait dans la branche d, la diagonale de la pile étant interrompue. On peut donc écrire

$$i = \frac{r\, I'_d}{d + b + \dfrac{g(a+c)}{g+a+c}} \frac{a+c}{g+a+c} = \frac{\delta}{k},$$

k étant la constante permanente du galvanomètre.

Des équations précédentes, on déduit la relation

$$\mathfrak{L} = r \frac{I'_d}{I_d} \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}.$$

Lorsqu'on utilise un galvanomètre sensible, la résistance r peut être très faible, de sorte que les courants I_d et I'_d ne diffèrent que d'une quantité négligeable. Il vient alors

$$\mathfrak{L} = r \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}$$

et, si T_0 est la demi-période d'oscillation sans amortissement du galvanomètre,

$$\mathfrak{L} = r \frac{T_0}{\pi} \frac{\alpha}{\delta}.$$

On rend cette méthode plus sensible en employant, comme l'a suggéré M. Ledeboer, un secohmètre actionné par un moteur dont on peut déterminer la vitesse angulaire. On

obtient ainsi, pour le régime variable, au lieu de l'élongation α, une déviation permanente δ', qui peut être considérée comme due à une force électromotrice $n\,\mathcal{L}\,I_d$, si n désigne le nombre de fois que le courant de la pile est interrompu et rétabli par seconde. On a, par suite,

$$\frac{n\,\mathcal{L}\,I_d}{r\,I'_d} = \frac{\delta'}{\delta};$$

d'où, si I'_d est pratiquement égal à I_d,

$$\mathcal{L} = r\,\frac{\delta'}{\delta}\,\frac{1}{n}. \qquad (1)$$

Au point de vue de la sensibilité, on remarquera que tout se passe alors comme si l'on avait accrû la résistance de la branche d d'une quantité $n\,\mathcal{L}$. Les conditions d'expérience les plus favorables sont celles indiquées, pour le pont ordinaire, à propos de la mesure des résistances. On voit d'après l'équation (1) que l'erreur absolue sur $\mathcal{L}$ est d'autant plus faible que n est plus grand. Il ne faut toutefois pas que la vitesse du secohmètre devienne telle que le régime variable soit inachevé au moment de la commutation. On s'en assurera en variant n légèrement : la valeur trouvée pour δ'/n ne doit pas changer.

Méthode industrielle de M. Joubert. — Lorsqu'une bobine de résistance r et de self-induction constante $\mathcal{L}$ est traversée par un courant rigoureusement sinusoïdal de fréquence f, son impédance vaut $\sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 \mathcal{L}^2}$.

Si l'on mesure l'intensité efficace I du courant à l'aide d'un ampèremètre spécial, tel qu'un électrodynamomètre, et la différence de potentiel efficace V aux bornes de la bobine par le moyen d'un voltmètre approprié, tel qu'un électromètre, on a

$$\sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 \mathcal{L}^2} = \frac{V}{I},$$

d'où l'on tire

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2\pi f}\left(\frac{V^2}{I^2} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On peut aussi mettre à la suite de la bobine essayée une résistance connue R sans réactance et déterminer la différence de potentiel efficace V' à ses bornes. Il vient alors

$$\frac{\sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 \mathcal{L}^2}}{R} = \frac{V}{V'},$$

soit

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2\pi f}\left(R^2 \frac{V^2}{V'^2} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Comme la méthode de Lord Rayleigh, cette dernière disposition ramène la mesure d'un coefficient de self-induction à une comparaison avec une résistance. Le conducteur sans réactance peut être constitué par des lampes à incandescence. On se placera dans les meilleures conditions, au point de vue de l'atténuation de l'influence des erreurs d'observation, en réglant R de manière à faire $V' = V$ et en cherchant à réaliser les déviations les plus grandes possibles. Mais avec les fortes impédances, on est ainsi conduit à des résistances sans réactance considérables.

La méthode décrite est communément employée par les praticiens avec les grands électro-aimants. Il va sans dire que le résultat ne donne alors qu'une valeur moyenne et assez grossière du coefficient de self-induction, lequel est essentiellement variable dans un électro-aimant parcouru par un courant périodique intense. On choisit pour l'essai un courant de mêmes fréquence, forme et intensité efficace que celui de service.

Il est intéressant de noter qu'un phasemètre renseignant le déphasage φ du courant sur la tension permet de déduire la constante de temps d'un circuit de la formule

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{2\pi f \mathcal{L}}{r}.$$

Comparaison d'une self-induction et d'une capacité. Méthodes de MM. Vaschy et de la Touanne, de M. Sumpner et de M. Kempe. — L'annulation des effets de la self-induction par ceux d'une capacité a conduit aux méthodes les plus

usitées dans les laboratoires pour la mesure du coefficient de self-induction des bobines sans fer et des petits électro-aimants. Ces procédés sont basés sur le fait qu'un condensateur de capacité c, shunté par une résistance r', se comporte dans un circuit parcouru par un courant variable comme une bobine de résistance r' et de self-induction $-cr'^2$.

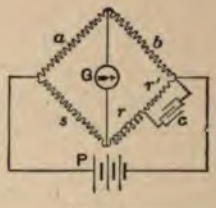


Fig. 199.

Soit un pont de Wheatstone comprenant trois côtés sans réactance a, b et s. Dans le quatrième côté, on dispose la bobine r, dont on cherche le coefficient de self-induction $\mathcal{L}$, en série avec une résistance R sur une partie de laquelle est dérivée une capacité c. On commence par équilibrer le pont pour le régime permanent. On réalise ensuite l'équilibre dans le régime variable, en modifiant les points de raccordement du condensateur avec le conducteur R. Si r' est la résistance comprise entre les armatures lorsque le galvanomètre reste au repos tant à l'ouverture qu'à la fermeture de la diagonale de la pile, on a

$$\mathcal{L} = cr'^2,$$

attendu que les sommes des constantes de temps des côtés opposés du pont doivent alors être égales et que la seule constante de temps ici en jeu est $(\mathcal{L} - cr'^2)/(r + \mathrm{R})$. Il faut exprimer c en farads et r' en ohms, pour obtenir $\mathcal{L}$ en henrys. On doit utiliser un galvanomètre à oscillations assez lentes, pour que l'inégalité de durée des périodes variables du condensateur et de la bobine inductive n'occasionne pas deux élongations de sens opposés.

La méthode ci-dessus, proposée par MM. Vaschy et de la Touanne, a été modifiée par eux comme suit, pour le cas où

les résistances ne se prêtent pas au réglage de l'équilibre dans le régime variable. On assure l'équilibre permanent; on observe ensuite l'élongation α due à l'extra-courant de la bobine seule, le condensateur étant enlevé, et on répète l'expérience après avoir ajouté le condensateur en dérivation sur une fraction r' de la résistance du côté du pont où se trouve la bobine, ce qui amène une élongation α'. Il est aisé de voir que

$$\frac{\mathcal{L}}{c\,r'^2} = \frac{\alpha}{\alpha - \alpha'}.$$

Dans la variante de M. Sumpner, le condensateur est dérivé sur une résistance R prise dans le côté du pont opposé à celui formé par la bobine essayée, fig. 200. Quand l'équilibre est établi dans le régime permanent et dans le régime variable,

$$\frac{\mathcal{L}}{r} - \frac{c\,R^2}{a} = 0,$$

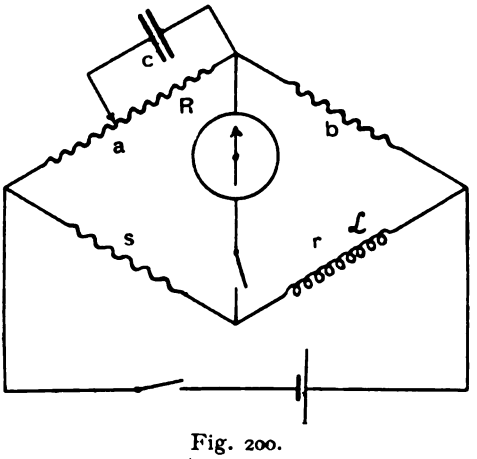


Fig. 200.

de sorte que

$$\mathcal{L} = \frac{r}{a}\,c\,R^2.$$

Ce procédé permet, comme on le voit, d'évaluer des self-inductions très différentes avec un même condensateur.

Pour éviter l'incertitude occasionnée souvent, avec les électro-aimants, par des oscillations du galvanomètre dues à l'aimantation et la désaimantation du noyau, M. Kempe fait deux essais distincts. L'équilibre dans le régime permanent est réglé avec l'électro-aimant de résistance r en circuit, fig. 201. Dans

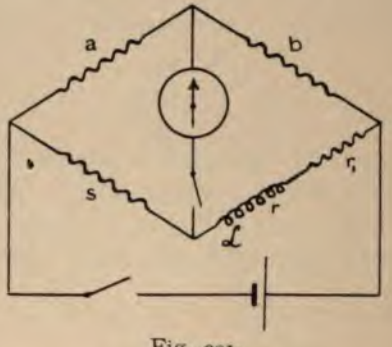


Fig. 201.

ces conditions, l'ouverture de la clef de la pile envoie dans le galvanomètre un extra-courant déterminant une élongation α. On remplace ensuite l'électro-aimant par le condensateur dérivé sur une résistance R et l'on substitue à la résistance r_1 une autre r_2 telle que $R + r_2 = r + r_1$. Si la décharge du condensateur provoque ainsi une élongation α' voisine de α, on a

$$\frac{\mathcal{L}}{c\,R^2} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Dans les méthodes de zéro de MM. Vaschy et de la Touanne et de M. Sumpner, l'établissement de l'équilibre dans le régime permanent exige un rhéostat à curseur dans l'un des côtés du pont. Si l'on ne peut régler la résistance dérivée sur le condensateur de manière à annuler l'élongation du galvanomètre, on procède par interpolation.

L'adjonction à ces dispositifs d'un commutateur tel que celui de MM. Ayrton et Perry accroît notablement la sensibilité, les élongations balistiques étant alors remplacées par des déviations permanentes. Mais, avec cet auxiliaire, il peut se produire, pour certaines vitesses de rotation, des résonances

entre les effets de capacité et de self-induction de nature à fausser complètement les résultats.

Méthode de M. Anderson. — On doit à M. Anderson une variante des procédés de comparaison des self-inductions et capacités, constituant un des dispositifs les plus commodes pour la mesure des premières, fig. 202.

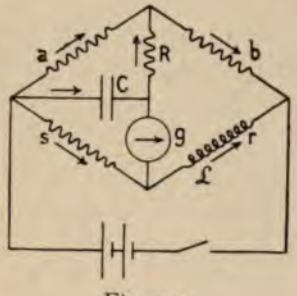


Fig. 202.

On commence par régler l'équilibre dans le régime permanent avec la résistance inductive r et trois résistances sans réactance a, b, s, dont une au moins est à curseur. On a alors $ar = bs$.

Sans changer les côtés du pont, on assure ensuite l'équilibre dans le régime variable, en disposant un condensateur C entre l'entrée du pont et le point de jonction du galvanomètre avec une résistance R, variable et sans réactance, qui sert seule au réglage. Supposons le courant dans le galvanomètre constamment nul et appelons i_a, $i_c = i_R$, $i_b = i_a + i_R$, $i_s = i_r$ les intensités instantanées des divers autres courants. Appliquons la seconde loi de Kirchhoff à la période de fermeture dans les circuits R b r g, C g s et a R C. Il vient

$$\mathrm{R}\, i_R + b\,(i_a + i_R) - r\, i_r = \mathcal{L}\frac{di_r}{dt}, \qquad (1)$$

$$-s\, i_r = -\frac{1}{\mathrm{C}}\int i_R\, dt, \qquad (2)$$

$$a\, i_a - \mathrm{R}\, i_R = \frac{1}{\mathrm{C}}\int i_R\, dt; \qquad (3)$$

d'où, en dérivant,

$$R\frac{di_R}{dt} + b\left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_R}{dt}\right) - r\frac{di_r}{dt} = \mathcal{L}\frac{d^2 i_r}{dt^2}, \qquad (1')$$

$$-s\frac{di_r}{dt} = -\frac{i_R}{C}, \qquad (2')$$

$$a\frac{di_a}{dt} - R\frac{di_R}{dt} = \frac{i_R}{C}. \qquad (3')$$

En substituant dans (1') les valeurs de di_r/dt, $d^2 i_r/dt^2$ et di_a/dt, tirées de (2') et (3'), on obtient

$$\frac{di_R}{dt}\left(R + \frac{Rb}{a} + b - \frac{\mathcal{L}}{sC}\right) = \frac{i_R}{C}\left(\frac{r}{s} - \frac{b}{a}\right)$$

et, comme $r/s = b/a$,

$$R + \frac{Rb}{a} + b - \frac{\mathcal{L}}{sC} = 0,$$

c'est-à-dire

$$\mathcal{L} = C\left(Rs + R\frac{b}{a}s + bs\right) = C\left[R(s+r) + bs\right].$$

On peut utiliser, avec la réserve faite au paragraphe précédent, un commutateur tournant pour accroître la sensibilité de cette méthode, qui convient aussi bien pour la mesure de petits que de grands coefficients de self-induction. Si l'on veut obtenir l'exactitude du millième, il faut éviter l'erreur due à ce que la capacité utile du condensateur dépend de la fréquence de commutation. Il convient donc de déterminer cette capacité par un procédé où la même fréquence est employée. Il faut, en outre, avoir égard aux erreurs pouvant résulter des self-inductions et capacités des bobines a, b, s, R et se mettre à l'abri des self-inductions et capacités parasites des fils de connexion, qu'on pliera en double pour éliminer les effets d'induction mutuelle dus aux courants variables du circuit.

M. Fleming se sert d'un téléphone, fig. 203, pour déceler l'équilibre dans le régime variable, les courants ondulatoires requis étant fournis par un mécanisme trembleur, tel qu'un électro-diapason, dont le fonctionnement est arrêté pour le réglage du régime permanent à l'aide d'un galvanomètre.

On peut aussi faire usage, comme dans la méthode de Maxwell, d'un galvanomètre oscillant, qui permet de surveiller le maintien de l'équilibre des résistances du pont pendant la période variable.

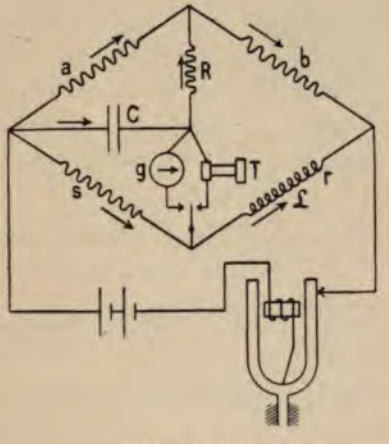


Fig. 203.

M. Stroud a modifié la méthode de M. Anderson en permutant la pile et le galvanomètre.

Méthode de Maxwell pour la comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle avec un coefficient de self-induction. — Soit une bobine d'induction dont l'un des enroulements possède une résistance r et une self-induction $\mathcal{L}$ connues. Formons un pont de Wheatstone avec cet enroulement et trois résistances a, b, c, fig. 204. Réglons ces résistances de manière à réaliser l'équilibre permanent. Cherchons ensuite à obtenir l'équilibre dans le régime variable, en opposant le flux électrique d'induction mutuelle de la bobine au flux de self-induction de l'enroulement considéré ci-dessus.

Si $\mathfrak{M}$ désigne le coefficient d'induction mutuelle de la bobine et I le courant permanent dans l'enroulement inducteur, la quantité d'électricité due à l'induction mutuelle est égale au rapport de $\mathfrak{M}$I à la résistance du circuit dans lequel est inséré l'enroulement induit r. La quantité d'électricité due à la self-

induction de celui-ci est, d'autre part, égale au quotient de $\mathfrak{L}I'$ par la même résistance, I' représentant le courant permanent

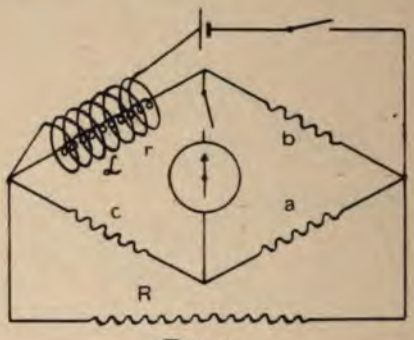


Fig. 204.

dans la branche r. Lorsque le galvanomètre n'accuse plus aucune élongation,

$$\mathfrak{M}\,I = \mathfrak{L}\,I'.$$

Mais

$$I' = I\,\frac{a+c}{a+c+r+b} = I\,\frac{c}{c+r},$$

en tenant compte de la relation $ar = bc$. On a donc

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1+\frac{r}{c}\right)}.$$

Il est à remarquer que le réglage de l'équilibre dans le régime variable trouble le régime permanent. La mesure exige, par suite, des tâtonnements assez longs pour arriver à satisfaire à la fois aux deux conditions.

Pour éviter cette difficulté, on peut dériver sur la diagonale de la pile une résistance R, qui ne modifie en rien l'équilibre permanent, et graduer cette résistance jusqu'à l'établissement de l'équilibre dans le régime variable. Dans ce cas,

$$\frac{I'}{I} = \frac{\dfrac{R\,(a+c)}{R+a+c}}{\dfrac{R\,(a+c)}{R+a+c}+r+b} = \frac{Rc}{Rc+Rr+bc+cr},$$

de sorte que

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1 + \frac{Rr + bc + cr}{Rc}\right)}.$$

Les deux dispositifs précédents impliquent l'inégalité $\mathfrak{L} > \mathfrak{M}$, attendu que $I > I'$. M. Brillouin a suggéré de mettre l'enroulement inducteur de la bobine dans la branche R, au lieu de le disposer dans la diagonale de la pile. Il vient alors, en appelant R' la résistance totale du shunt comprenant cet enroulement,

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{L}\frac{R'}{r + b}.$$

Ces méthodes permettent l'emploi d'un commutateur rotatif pour accroître la sensibilité.

Comparaison de deux coefficients d'induction mutuelle. — Les coefficients d'induction mutuelle de deux bobines d'induction peuvent être comparés en observant, à l'aide d'un galvanomètre balistique de période suffisamment longue, les quantités d'électricité induites dans les enroulements secondaires par la fermeture ou l'ouverture des circuits primaires.

Pour transformer la mesure en une méthode de zéro analogue à celle de Lacoine, p. 237, il suffit de grouper, comme le

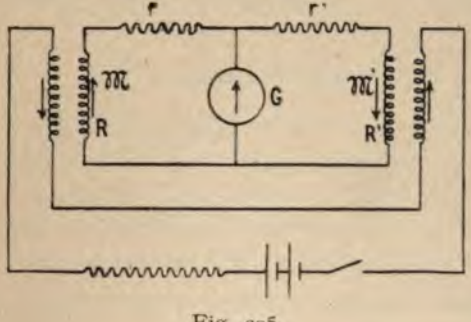


Fig. 205.

montre la fig. 205, les enroulements primaires en série avec une résistance, une pile et une clef, tandis que les enroule-

ments secondaires R et R′ forment, avec deux résistances de réglage r et r', un circuit sur lequel est dérivé le galvanomètre. Quand celui-ci reste immobile lors de la fermeture ou de l'ouverture de la clef, on a, en appelant $\mathfrak{M}$ et $\mathfrak{M}'$ les coefficients d'induction mutuelle examinés,

$$\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{M}'} = \frac{r + R}{r' + R'}.$$

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle et d'une capacité. Méthodes d'élongation et de réduction à zéro de MM. Vaschy et de la Touanne. — La quantité d'électricité $\mathfrak{M}\,I/\rho$, induite dans un circuit de résistance ρ par la suppression d'un courant inducteur I, peut être estimée par l'élongation α qu'elle communique à un galvanomètre balistique :

$$\frac{\mathfrak{M}\,I}{\rho} = \frac{\alpha}{K}\, e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

D'autre part, si l'on charge un condensateur de capacité c en reliant ses armatures aux extrémités d'une résistance ρ' parcourue par le même courant I, sa décharge dans le galvanomètre occasionne une élongation α' telle que

$$c\,I\,\rho' = \frac{\alpha'}{K}\, e^{\frac{\lambda'}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda'}}.$$

De ces deux expériences on déduit

$$\mathfrak{M} = c\,\rho\,\rho'\,\frac{\alpha}{\alpha'}\, e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda} - \frac{\lambda'}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\lambda'}}.$$

Il est aisé de voir que la mesure est d'autant plus précise que α et α' sont plus grands.

Les facteurs d'amortissement doivent être déterminés d'après les conditions spéciales des circuits. Pour les essais de l'espèce,

il est utile de joindre aux galvanomètres à cadre mobile une table renseignant ces facteurs en fonction des résistances en jeu.

La présence de noyaux en fer dans les bobines conduit ici aux mêmes difficultés que lorsqu'il s'agit de l'évaluation des coefficients de self-induction, par suite de l'accroissement de durée de la période variable et du changement de $\mathfrak{M}$ avec la perméabilité.

MM. Vaschy et de la Touanne ont basé sur le principe précédent une méthode de zéro, en utilisant la disposition de la fig. 206, qui permet d'équilibrer les effets des deux flux

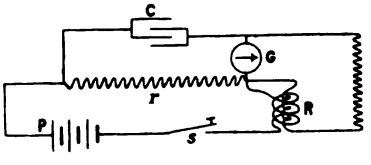


Fig. 206.

électriques sur le galvanomètre. Le condensateur c est dérivé sur une boîte de résistances r, mise en circuit avec une pile, une clef et l'enroulement primaire de la bobine étudiée. Désignons par R la résistance totale de l'enroulement secondaire et d'un rhéostat en série avec lui.

En appelant e la force électromotrice de la pile et r' les résistances du circuit de cette dernière autres que r, on a, pour l'intensité du courant permanent,

$$I = \frac{e}{r + r'}. \qquad (1)$$

Soient $\mathcal{L}$ la self-induction de l'enroulement induit, $\mathcal{L}_g$ celle du galvanomètre et i, i', i'' les valeurs, à un moment quelconque de la période variable d'ouverture de la clef, des courants dans l'enroulement inducteur, l'enroulement induit et le galvanomètre. La seconde loi de Kirchhoff, appliquée à cet instant au circuit de l'enroulement induit et du galvanomètre, donne la relation

$$R\,i' + g\,i'' = -\mathfrak{M}\frac{di}{dt} - \mathcal{L}\frac{di'}{dt} - \mathcal{L}_g\frac{di''}{dt}.$$

Si l'on multiplie les deux membres par dt et si l'on intègre entre les limites de la période variable considérée, en remarquant que les courants i' et i'' sont nuls à ces époques et que le courant i varie de I à o, il vient

$$R\,q' + g\,q'' = \mathfrak{M}\,I, \qquad (2)$$

q' et q'' représentant les quantités d'électricité transportées par les courants i' et i''. Or, les flux électriques q' et q'' sont liés à la charge $c\,r\,I$ du condensateur par l'égalité

$$c\,r\,I = q' - q''. \qquad (3)$$

En éliminant q' entre les équations (2) et (3), on obtient

$$q'' = \frac{I\,(\mathfrak{M} - c\,r\,R)}{g + R}$$

et l'on voit que l'élongation du galvanomètre est nulle pour

$$\mathfrak{M} = c\,r\,R. \qquad (4)$$

Afin de déterminer les meilleures conditions d'expérience, remplaçons I par son expression (1) en écrivant

$$q'' = \frac{e\,(\mathfrak{M} - c\,r\,R)}{(r + r')\,(g + R)} = \frac{e\,(\mathfrak{M} - c\,r\,R)}{\Delta}.$$

La différence $\mathfrak{M} - c\,r\,R$ étant nécessairement très petite au voisinage de l'équilibre, on peut dire que l'élongation est maxima quand le dénominateur Δ est minimum. Égalons à zéro la dérivée de Δ par rapport à r :

$$\frac{d\Delta}{dr} = (g + R) + (r + r')\,\frac{dR}{dr} = o; \qquad (5)$$

remarquons que, d'après (4),

$$R + r\,\frac{dR}{dr} = o \qquad (6)$$

et éliminons dR/dr entre (5) et (6). On trouve ainsi, pour le rapport R/r qui procure le maximum de sensibilité,

$$\frac{R}{r} = \frac{g + R}{r + r'} = \frac{g}{r'}.$$

La méthode de zéro présente l'avantage de permettre l'emploi d'un galvanomètre très sensible. Par contre, elle a l'inconvénient, lorsqu'on opére sur des bobines d'induction avec noyau de fer, de donner lieu à une incertitude résultant des oscillations du galvanomètre causées par l'inégalité de durée de la décharge du condensateur et de la désaimantation du noyau.

MESURES MAGNÉTIQUES.

Chapitre XVIII.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre. Méthode du magnétomètre de Gauss. — Un barreau aimanté droit est suspendu horizontalement, dans une cage fermée par une glace, à l'aide d'un fil ou d'un faisceau de fils de cocon assez long pour ne pas développer de couple de torsion appréciable, fig. 207. Un miroir est fixé à l'axe de suspension, afin de permettre l'observation des déviations sur une échelle.

On fait osciller l'aimant, sans lui communiquer de mouvement pendulaire, en approchant un second barreau de la boîte, suivant la direction Est-Ouest passant par le centre du premier. On détermine ainsi une déviation d'environ 3°, puis on retire le barreau auxiliaire et l'on mesure la durée de la période d'oscillation. Pour cela, un observateur note les passages de l'aimant et donne un signal, en prononçant le mot *top* par exemple, après chaque dizaine d'oscillations complètes, pendant qu'un autre observateur lit les temps correspondants sur un chronomètre marquant le cinquième de seconde.

On sait que, si l'on fait osciller dans le champ magnétique terrestre, suivant l'horizontale, un barreau aimanté suspendu

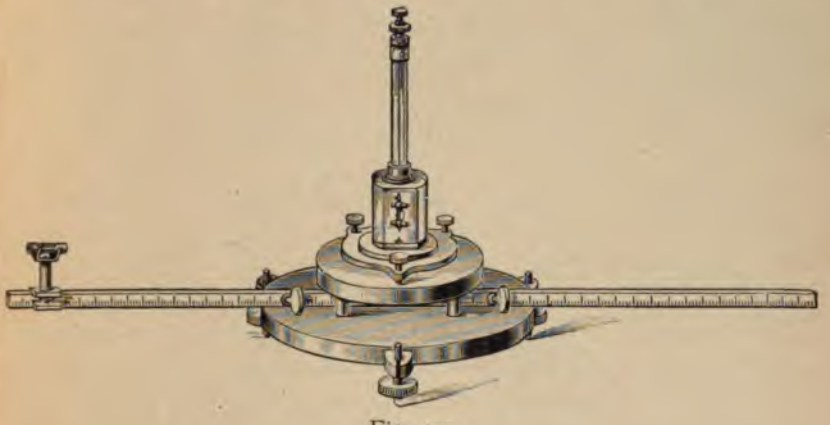


Fig. 207.

à un fil sans réaction de torsion sensible, la durée d'une oscillation complète, pour une amplitude suffisamment faible, satisfait à la relation

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{\mathfrak{M}\,\mathcal{H}}},$$

où Ω représente le moment d'inertie du barreau, $\mathfrak{M}$ son moment magnétique et $\mathcal{H}$ la composante horizontale du champ terrestre. On tire de là

$$\mathfrak{M}\,\mathcal{H} = \frac{4\pi^2\,\Omega}{T^2}, \qquad (1)$$

en calculant le moment d'inertie de l'aimant d'après le poids et les dimensions de celui-ci.

Après l'expérience d'oscillation, on effectue un essai de déviation en posant le barreau aimanté, normalement au méridien magnétique, sur une règle divisée horizontale, fig. 208, et en suspendant à une certaine distance, sur le prolongement de son axe, une petite aiguille de déclinaison de moment magnétique $\mathfrak{M}'$. L'aiguille mobile, sollicitée d'une part par le champ terrestre et d'autre part par l'aimant, prend

une position d'équilibre correspondant à un angle α entre son axe et le méridien magnétique.

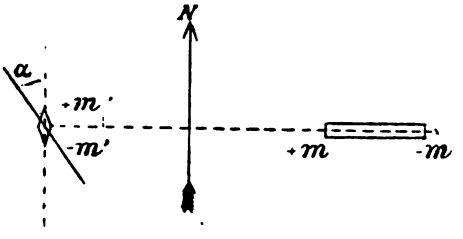


Fig. 208.

Vu la petitesse de l'aiguille, on peut admettre que le champ de l'aimant a une intensité uniforme $\mathcal{H}'$ dans l'espace où elle se meut. Le couple terrestre agissant sur l'aiguille a pour moment

$$c = \mathfrak{A}' \mathcal{H} \sin \alpha$$

et le couple dû au barreau

$$c' = \mathfrak{A}' \mathcal{H}' \cos \alpha.$$

Mais, si $2l$ est la distance des pôles du barreau, a celle des centres de l'aimant et de l'aiguille, $+m$ et $-m$ les masses polaires de l'aimant,

$$\mathcal{H}' = \frac{m}{(a-l)^2} - \frac{m}{(a+l)^2} = \frac{4alm}{(a^2-l^2)^2},$$

de sorte que

$$c' = 2\,\mathfrak{A}\,\mathfrak{A}'\,\frac{a\cos\alpha}{(a^2-l^2)^2}.$$

En l'absence de réaction de torsion de la supension, l'équation d'équilibre est, par suite,

$$\mathfrak{A}' \mathcal{H} \sin \alpha = 2\,\mathfrak{A}\,\mathfrak{A}'\,\frac{a\cos\alpha}{(a^2-l^2)^2}$$

ou

$$\frac{\mathfrak{A}}{\mathcal{H}}\left(1-\frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = \frac{a^3 \operatorname{tang}\alpha}{2}.$$

Or,

$$\left(1 - \frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = 1 + 2\frac{l^2}{a^2} + 3\frac{l^4}{a^4} + \dots$$

et, si l est suffisamment petit, on peut négliger les puissances de l/a supérieures à la seconde. Il vient alors

$$\frac{\mathfrak{A}}{\mathcal{H}}\left(1 + 2\frac{l^2}{a^2}\right) = \frac{a^3 \operatorname{tang} \alpha}{2}. \qquad (2)$$

On ne connaît pas, en général, la distance réelle des pôles de l'aimant. On peut éliminer cet élément en renouvelant l'expérience de déviation pour un écartement moindre a' de l'aiguille. On obtient ainsi une nouvelle déviation α', telle que

$$\frac{\mathfrak{A}}{\mathcal{H}}\left(1 + 2\frac{l^2}{a'^2}\right) = \frac{a'^3 \operatorname{tang} \alpha'}{2}. \qquad (3)$$

D'où, en soustrayant (3) de (2) après avoir multiplié (2) par a^2 et (3) par a'^2,

$$\frac{\mathfrak{A}}{\mathcal{H}} = \frac{a^5 \operatorname{tang} \alpha - a'^5 \operatorname{tang} \alpha'}{2(a^2 - a'^2)}. \qquad (4)$$

Les formules (1) et (4) permettent de déterminer séparément le moment magnétique de l'aimant et l'intensité horizontale du champ terrestre.

Lorsqu'on cherche à atteindre une grande exactitude dans l'estimation du rapport $\mathfrak{A}/\mathcal{H}$, plusieurs corrections sont nécessaires.

La formule (4) montre que ce rapport est fortement influencé par les erreurs commises dans la mesure de a et a'. Pour éviter l'erreur provenant d'une excentricité de l'axe du magnétomètre par rapport à l'axe de suspension de l'aiguille, on répète les expériences de déviation en plaçant l'aimant agissant dans des positions symétriques de part et d'autre de l'appareil, et on prend des moyennes. En vue de corriger l'erreur pouvant résulter d'une excentricité du centre magnétique de l'aimant, on retourne celui-ci bout pour bout dans chacune de ses positions et on adopte la moyenne des lectures.

La déviation α' doit être aussi grande que possible, sans que

relativement à la période d'oscillation du galvanomètre. Si celui-ci est à aimant fixe, l'on diminue l'importance de la correction pour l'amortissement en introduisant une grande résistance additionnelle dans le circuit.

Pour éviter cette correction, on peut procéder comme suit. On met en série avec l'inclinomètre et le galvanomètre une petite bobine enroulée sur le milieu d'un long solénoïde et, après l'expérience ci-dessus, on envoie dans ce dernier un courant de I ampères, qui développe un flux magnétique de $4\pi n_1 I s \times 10^{-1}$ maxwells, si n_1 désigne le nombre de spires par cm du solénoïde de section moyenne égale à s cm^2. La petite bobine, présentant n' spires, produit ainsi, pendant la période variable du courant inducteur, une quantité d'électricité

$$q' = \frac{\alpha'}{K} e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}} = \frac{4\pi n_1 s n' I \times 10^{-1}}{R \times 10^9 \times 10^{-1}} \text{ coulombs.} \qquad (2)$$

L'amortissement du galvanomètre étant le même dans les deux mesures, on tire de (1) et (2)

$$\mathcal{H} = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{\pi n_1 s n' I}{5 a n}. \qquad (3)$$

L'intensité I du courant dans le solénoïde est estimée par un ampèremètre.

Avec un galvanomètre à aimant mobile, dont l'amortissement est peu influencé par la résistance du circuit, on peut recourir à la décharge d'un condensateur de capacité connue, c microfarads, chargé au moyen d'une pile étalon ayant une force électromotrice de E volts. On a

$$q'' = c E \times 10^{-6} = \frac{\alpha''}{K} e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}} \text{ coulombs} \qquad (4)$$

et, en combinant (1) et (4),

$$\mathcal{H} = \frac{\alpha}{\alpha''} \frac{5o R c E}{a n}. \qquad (5)$$

Si l'on prend la différentielle logarithmique des équations (3) et (5), on voit que l'erreur relative limite sur $\mathcal{H}$ est la somme des erreurs relatives commises sur les quantités qui entrent dans les seconds membres. On se placera dans les conditions les plus favorables, au point de vue des lectures, en cherchant à obtenir les élongations les plus grandes possibles.

Détermination de l'intensité du champ dans l'entrefer d'une dynamo. Méthode par induction. Méthode basée sur le phénomène de Hall. — Le procédé basé sur l'induction permet d'évaluer l'intensité d'un champ magnétique très resserré, tel que celui de l'entrefer des dynamos, car il est possible d'introduire dans un champ semblable une petite bobine aplatie et allongée, composée de spires agglutinées par de la gomme-laque, comme dans les cadres des galvanomètres Deprez et d'Arsonval, et enfermée entre des joues de mica pour éviter l'érosion de l'isolant par le frottement. En retirant vivement la bobine reliée à un galvanomètre, de manière à l'amener dans une position où le flux magnétique qui la traverse est négligeable, on produit un déplacement d'électricité mesuré par l'élongation de l'appareil. Pour déterminer la constante balistique de celui-ci, on peut se servir d'un inclinomètre intercalé dans le circuit ou s'aider du solénoïde dont il a été question plus haut.

Remarquons, en passant, qu'un moyen analogue convient pour étudier la répartition du magnétisme d'un aimant. On fait glisser par saccades une bobine le long de ce dernier. Les quantités d'électricité induites dans l'enroulement sont proportionnelles aux flux coupés par les spires et, si celles-ci enserrent assez étroitement l'aimant, on peut en déduire la distribution des lignes de force émises.

M. Leduc a indiqué l'accroissement de la résistance électrique du bismuth placé dans un champ magnétique comme un procédé propre à la mesure de l'intensité de celui-ci [1].

---

[1] E. Van Aubel ; *Éclairage Électrique*. 1 juin 1895.

Dans l'appareil construit par MM. Hartmann et Braun, un fil mince de bismuth, d'une résistance d'environ 10 ohms, est contourné en double spirale, pour annuler la self-induction, et logé entre deux lamelles de mica, de manière que l'épaisseur totale ne dépasse pas 0,5 mm, fig. 210. Le fil est raccordé à deux

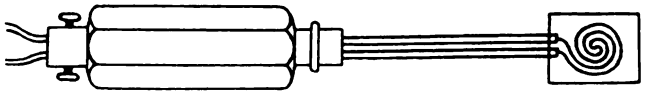


Fig. 210.

bandes de cuivre protégées par une gaine en ébonite. Il peut être introduit dans un entrefer très exigu. On détermine rapidement sa résistance, avant et après l'introduction, à l'aide d'un pont de Kohlrausch à téléphone. L'augmentation de résistance n'est pas tout à fait proportionnelle à l'intensité du champ. Il faut graduer l'instrument expérimentalement ou utiliser une courbe empirique livrée par le constructeur. On ne peut d'ailleurs s'en servir que pour des intensités supérieures à 1000 gauss.

Chapitre XIX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

Généralités. — Le contrôle des fers, fontes et aciers utilisés pour la construction des dynamos et des transformateurs est d'une importance capitale. Dans les dynamos on peut, à la rigueur, corriger un défaut de perméabilité par un excès de cuivre sur l'inducteur, mais dans les transformateurs, où toute la place disponible est occupée par le cuivre, une insuffisance magnétique de la carcasse est sans remède.

L'analyse chimique renseigne incomplètement sur les qualités magnétiques. On cherche à restreindre la teneur en carbone, en soufre et en phosphore des aciers pour induits. Une légère proportion de manganèse n'est pas désavantageuse, pourvu qu'elle ne dépasse pas 0,4 pour 100, et une proportion de 3 à 4 pour 100 de silicium a été reconnue utile au point de vue de la diminution des pertes par hystérésis et par courants de Foucault. L'état physique du métal joue un rôle important. Aussi des essais magnétiques sont indispensables.

Ces essais comportent l'évaluation de la perméabilité et de l'hystérésis pour diverses inductions. On sait qu'il est possible de déduire les quantités susdites des courbes cycliques représentant l'induction dans le noyau d'un électro-aimant en fonc-

tion de la force magnétisante. Ces courbes s'obtiennent le plus souvent par des méthodes basées sur l'induction électromagnétique. La perte par hystérésis s'estime en planimétrant l'aire qu'elles enferment. On peut aussi la trouver directement en mesurant la puissance électrique absorbée par la bobine de l'électro-aimant quand on y fait passer des courants alternatifs, réserve étant faite de l'effet Joule et des courants de Foucault. Enfin, il existe une série de procédés reposant sur l'emploi d'appareils spéciaux, dont quelques-uns, tels que les hystérésimètres, sont d'un usage très simple et conviennent à des expériences d'atelier.

Lorsqu'on doit éprouver le métal destiné à des carcasses inductrices de machines, on opère habituellement sur un témoin cylindrique tourné dans un lingot. Mais, quand il s'agit de tôles pour induits ou transformateurs, on préfère soumettre aux mesures hystérétiques des fragments découpés hors de ces tôles mêmes.

On ne doit pas s'attendre à une grande précision dans les essais magnétiques. La structure hétérogène donnée au métal par l'étirage, le laminage ou le travail des outils peut apporter des différences notables suivant la direction de la force magnétisante. Dans une même tôle, l'hystérésis varie parfois de 10 à 20 pour 100 du milieu aux extrémités. La perte hystérétique mesurée en soumettant une éprouvette à un champ magnétique alternatif est autre que celle constatée en faisant tourner cette éprouvette dans un champ constant. La première est appelée *hystérésis alternative ;* c'est celle des noyaux de transformateurs. La seconde, désignée sous le nom d'*hystérésis tournante*, se rencontre dans l'induit des dynamos. Il est indispensable de recuire les échantillons essayés, si l'on veut arriver à des résultats comparables. Pour les raisons qui précèdent, on ne s'étonnera pas de trouver des divergences de 30 à 50 pour 100 entre les chiffres correspondant à des méthodes différentes appliquées à une même qualité de fer. Afin de permettre de tenir compte des erreurs systématiques, il faut toujours avoir soin de mentionner la méthode d'essai employée, en indiquant tous les détails propres à la répétition de l'expérience.

Il serait utile de se mettre d'accord sur un procédé opératoire déterminé, en vue d'éviter les écarts systématiques des méthodes. Une telle convention a été adoptée par les électriciens allemands, qui caractérisent la qualité des tôles fines, de 0,5 mm d'épaisseur environ, par le nombre donnant, en watts par kilogramme, la perte totale due à l'hystérésis et aux courants de Foucault sous une induction maxima de 10000 gauss, une fréquence de 50 périodes par seconde et une température de 30° C. On verra plus loin comment ce nombre s'estime expérimentalement à l'aide du wattmètre.

Pratiquement, la puissance dissipée par hystérésis et courants de Foucault, à la fréquence f et sous l'induction maxima $\mathcal{B}_0$, peut être calculée, pour l'unité de volume, par la formule

$$p = \eta_1 f \mathcal{B}_0^{1,6} + A f^2 \mathcal{B}_0^2,$$

où η_1 est un coefficient qui ne doit pas excéder 0,001 5 dans les tôles d'induits et de transformateurs, quand toutes les quantités sont exprimées en unités C. G. S.

Avant tout essai d'hystérésis, il importe de ramener l'échantillon à l'état neutre, en le soumettant à un champ alterné décroissant. De même, avant de relever un cycle magnétique entre certaines limites d'induction, il est bon d'accomplir plusieurs cycles entre ces limites. Cette éducation de l'éprouvette est nécessaire pour l'obtention de courbes symétriques. E. Searle a reconnu que l'application d'une force magnétisante alternative, légèrement supérieure au champ critique correspondant au maximum de perméabilité, ramène pratiquement le fer à l'état neutre. Avec les tôles, il faut environ 10 gauss. Une centaine de cycles complets, parcourus ensuite entre des limites d'induction constantes, établissent un régime magnétique bien défini.

Lorsque l'induction maxima est inférieure à 10000 gauss, il intervient un phénomène de viscosité, qui augmente la perte de puissance et oblige à ajouter à la formule ci-dessus un terme supplémentaire de la forme $\varepsilon f (10000 - \mathcal{B}_0) \mathcal{B}_0^{1,6}$, qui doit être laissé de côté pour $\mathcal{B}_0 > 10000$.

La nécessité de restreindre l'énergie perdue dans le noyau

des induits et des transformateurs a conduit à l'étude d'aciers à grande résistivité et faible coefficient de température, qui ont une teneur de 3 à 4 pour 100 en silicium. Les tôles de cette nature possèdent une perméabilité moindre que celle des bonnes tôles anciennes en acier extra-doux, mais leur perte par hystérésis et courants de Foucault plus réduite permet d'atteindre un plus haut degré de saturation. Leur coefficient d'hystérésis descend jusque 0,001. Leur résistivité vaut 4 fois celle des tôles ordinaires, tandis que leur coefficient de variation de résistance avec la température est 6 fois plus petit. Pour des inductions maxima de 5000, 10000 et 15000 gauss, la perte spécifique totale par hystérésis et courants de Foucault, mesurée à l'aide du wattmètre, varie comme 1 : 3,3 : 7,3 dans les tôles en acier extra-doux, et comme 0,5 : 1,6 : 4 dans les tôles nouvelles.

Le *vieillissement* des tôles peut être défini par le pourcentage d'accroissement du coefficient d'hystérésis lorsque l'échantillon est maintenu à 100° C pendant un temps assez long. Pour les tôles nouvelles, ce coefficient ne s'élève que de 4 pour 100 en 600 heures, tandis que, pour d'autres qualités, son augmentation atteint 30 à 50 pour 100.

Méthode magnétométrique. — La méthode de M. Ewing pour la détermination de la perméabilité d'un échantillon de métal magnétique est basée sur l'action qu'un long barreau vertical de cette substance, aimanté par un solénoïde, exerce sur un petit magnétomètre, tel que celui décrit au chapitre précédent, fig. 211.

On sait que, si la longueur du noyau et de la bobine magnétisante vaut au moins 500 fois le diamètre de celle-ci, on peut admettre une distribution uniforme du flux dans l'éprouvette. En désignant par $\mathcal{J}$ l'intensité d'aimantation et par $\mathcal{H}$ la force magnétisante égale à $4\pi/10$ fois le nombre d'ampères-tours par cm de la bobine, on a, pour la perméabilité,

$$\mu = \frac{\mathcal{H} + 4\pi\mathcal{J}}{\mathcal{H}}. \qquad (1)$$

Il suffit donc d'évaluer $\mathcal{J}$ pour permettre le calcul de μ.

Le courant qui excite la bobine magnétisante B est fourni par une batterie d'accumulateurs, mesuré par un ampèremètre *g* et réglé par un rhéostat permettant de varier son intensité par degrés insensibles. Ce rhéostat est constitué par un vase en poterie rempli d'une solution aqueuse de sulfate zincique, dans laquelle plongent deux électrodes en zinc fixes *a* et *b*, reliées aux éléments secondaires, ainsi que deux électrodes mobiles *c* et *d* également en zinc, portées par un tambour pouvant tourner autour d'un axe vertical et raccordées au circuit par deux contacts à bagues. La rotation du tambour

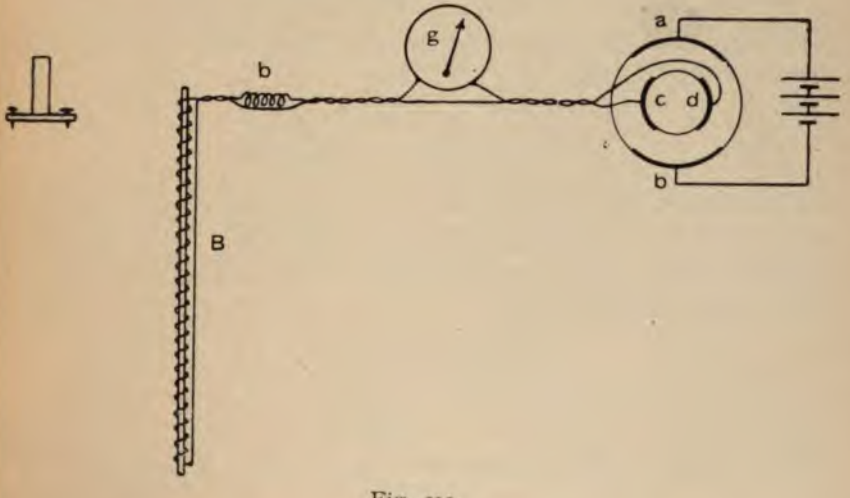


Fig. 211.

intervertit le sens du courant magnétisant, en faisant passer son intensité graduellement par toutes les valeurs comprises entre un maximum positif et un maximum négatif. L'action de la bobine B sur l'aiguille aimantée est neutralisée grâce à une bobine compensatrice *b*. L'influence assez minime de la composante verticale du magnétisme terrestre sur le barreau peut, si la précision l'exige, être annulée par celle d'un enroulement supplémentaire entourant l'électro-aimant et traversé par un courant de nature à créer un champ égal et opposé à cette composante. Tous les fils de connexion sont tordus pour être sans effet sur le magnétomètre.

Avant toute mesure, il convient d'amener l'éprouvette à l'état neutre. A cet effet, on fait passer dans la bobine B des courants alternés dont on réduit progressivement l'amplitude en diminuant le nombre des couples voltaïques ou en insérant des résistances croissantes dans le circuit.

Le magnétomètre doit être disposé de manière que la droite, de longueur a, menée du centre de l'aiguille mobile normalement à l'éprouvette soit dans la direction est-ouest. L'échantillon est ensuite amené à une hauteur telle que, pour un courant donné, son action sur l'aiguille soit maxima, ce qui a lieu quand la normale susdite aboutit au pôle supérieur.

Si l et s désignent la longueur vraie et la section du barreau, la composante horizontale du champ que celui-ci produit à l'endroit de l'aiguille est

$$\mathcal{H}_1 = \mathcal{J} s \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2 + l^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}} \right)$$

et l'angle θ d'équilibre de l'aiguille, de moment magnétique $\mathfrak{A}$, correspond à l'égalité entre le couple $\mathcal{H}_1 \mathfrak{A} \cos\theta$ et le couple $\mathcal{H}_2 \mathfrak{A} \sin\theta$ dû à la composante horizontale du champ terrestre. Après réduction, il vient

$$\mathcal{J} = \frac{a^2}{s} \frac{\mathcal{H}_2 \operatorname{tang} \theta}{1 - \frac{a^3}{(a^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}}.$$

Si l est suffisamment grand par rapport à a, on peut écrire

$$\mathcal{J} = \frac{a^2}{s} \mathcal{H}_2 \operatorname{tang} \theta. \qquad (2)$$

L'équation (2), jointe à la relation (1), détermine la perméabilité de l'échantillon pour une valeur donnée de la force magnétisante.

En faisant varier cycliquement cette dernière, on peut tracer la courbe $\mathcal{B} = \mu \mathcal{H} = f(\mathcal{H})$ et déduire de sa surface la perte par hystérésis correspondant aux limites d'induction atteintes.

La méthode dont il vient d'être question nécessite la connaissance de la composante horizontale du magnétisme terrestre et exige des éprouvettes de grande longueur, dont la

préparation est difficile. De plus, le magnétomètre est très influençable par les champs parasites.

Méthodes basées sur l'induction électromagnétique. Dispositifs de MM. Rowland, Hopkinson, Ewing et Drysdale. — Pour tirer parti de l'induction électromagnétique, qui a été appliquée en premier lieu par M. Rowland, on utilise ordinairement une éprouvette annulaire N, fig. 212. Si

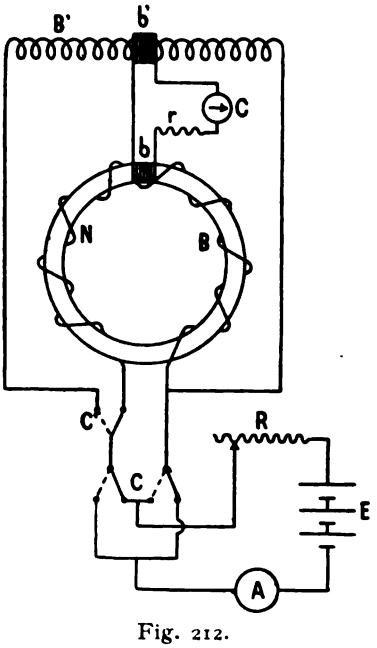


Fig. 212.

l'épaisseur de l'anneau est faible, condition à laquelle on peut satisfaire en adoptant la forme d'un tube court, on obtient, à l'intérieur d'une bobine magnétisante continue B, enroulée sur l'éprouvette et comportant par cm n_1 spires parcourues par un courant de i ampères, un champ d'intensité constante $\mathcal{H} = 4\pi n_1 i \times 10^{-1}$ gauss. Une petite bobine b, reliée à un galvanomètre balistique G, permet d'évaluer le flux que le courant d'excitation, débité par une batterie d'accumulateurs E et mesuré par un ampèremètre A, engendre dans le noyau.

L'éprouvette est façonnée au tour dans la masse de fer à essayer ou résulte de l'empilement de rondelles découpées à l'emporte-pièce s'il s'agit de tôles. Les dimensions habituelles sont : 10 cm de diamètre extérieur, 5 mm d'épaisseur radiale et 2 cm de largeur. Le rayon intérieur doit en tout cas valoir au moins 5 fois l'épaisseur. Il ne faut pas employer des noyaux dont la section est supérieure à quelques centimètres carrés, sinon l'aimantation est trop lente et les lectures peuvent être faussées.

Quand le galvanomètre est un appareil Deprez et d'Arsonval, il convient que sa période d'oscillation atteigne 5 à 15 secondes. Afin d'éviter le calcul du facteur d'amortissement, on étalonne l'instrument sans changer la résistance du circuit dont il fait partie. Le procédé suivant est commode à cet effet. Un commutateur C' permet d'envoyer le courant de la source électrique dans un long solénoïde B' de n'_1 spires par cm, enroulé sur un cylindre en bois ou en verre d'une section de s cm^2 de manière à produire un flux exprimé en maxwells par $4\pi n'_1 s/10$ fois l'intensité du courant en ampères. Une bobine auxiliaire b' entourant la région médiane du solénoïde est intercalée dans le circuit du galvanomètre et de la bobine b. Si b et b' ont le même nombre de spires, les flux développés par les enroulements B et B' sont entr'eux comme les élongations correspondantes α et α' du galvanomètre, dont l'amortissement n'est pas modifié. On pourrait aussi étalonner le galvanomètre à l'aide d'un condensateur de capacité connue, chargé à une différence de potentiel déterminée; mais il faudrait alors estimer les valeurs du décrément logarithmique dans les expériences comparatives.

Un rhéostat R, en série avec la pile secondaire, sert à faire varier par degrés l'intensité du courant inducteur, dont un inverseur C peut changer le sens. Le galvanomètre reçoit ainsi des impulsions successives, qui permettent de calculer les accroissements progressifs du flux à travers l'éprouvette. Soient $\mathcal{B}$ gauss l'induction magnétique dans le noyau N pour un courant i et $\mathcal{B}'$ gauss celle correspondant à un courant i', S cm^2 la section de ce noyau, n le nombre de spires de la bobine b et r ohms la résistance du circuit galvanométrique. La décharge

q due à une variation $i - i'$ est donnée, en coulombs, par

$$q \times 10^{-1} = \frac{(\mathcal{B} - \mathcal{B}')\, n\, S}{r \times 10^{9}}.$$

On peut déterminer de la sorte les valeurs de l'induction $\mathcal{B}$ en fonction de la force magnétisante $\mathcal{H}$ et en tirer les valeurs correspondantes de la perméabilité

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{4\pi n_1 i \times 10^{-1}}.$$

Le tracé des courbes d'aimantation est moins exact par ce procédé que par la méthode magnétométrique, attendu que, comme les points consécutifs sont obtenus en additionnant les grandeurs déduites des élongations successives du galvanomètre, les erreurs commises s'accumulent.

Quand la bobine b est enroulée autour de la bobine magnétisante B, il est nécessaire, dans les essais précis, de faire une correction pour tenir compte de la différence entre le diamètre extérieur de cette dernière et celui du noyau N. L'intervalle que ces diamètres limitent est, en effet, le siège d'un flux égal à la force magnétisante moyenne multipliée par la section de l'intervalle. La correction est minime si le noyau n'est pas très mince.

Pour permettre l'emploi d'éprouvettes cylindriques courtes et éviter l'accumulation d'erreurs signalée ci-dessus, M. Hopkinson a adopté le dispositif suivant, fig. 213. Le barreau de

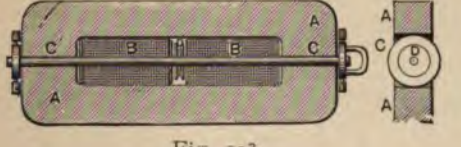


Fig. 213.

1 à 2 cm de diamètre, dont il s'agit de mesurer la perméabilité, est formé de deux tronçons C et C' juxtaposés. Il traverse une masse de fer forgé AA, un enroulement magnétisant BB et une petite bobine D reliée au galvanomètre. Cette dernière bobine est sollicitée latéralement par une bande de caoutchouc,

de telle sorte que, si l'on écarte légèrement les deux tronçons C et C' à l'aide des poignées qui les terminent, elle est tirée hors de l'appareil en engendrant une quantité d'électricité en rapport avec l'induction magnétique du barreau.

Le bloc de fer et l'éprouvette constituent un circuit magnétique fermé, qui est le siège d'un flux égal à $\mathfrak{N}$ maxwells, créé par une force magnétomotrice de $4\pi m i \times 10^{-1}$ unités C. G. S., m et i désignant respectivement le nombre total de spires et l'intensité en ampères du courant de l'enroulement B B. Soient l cm la longueur du barreau limitée par le vide du bloc, s cm² la section de l'éprouvette, μ la perméabilité de celle-ci, l' cm le parcours moyen des lignes magnétiques dans le bloc, s' cm² la section et μ' la perméabilité de ce dernier. Si la dispersion magnétique est nulle, on a

$$4\pi m i \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{N} l}{\mu s} + \frac{\mathfrak{N} l'}{\mu' s'}.$$

En négligeant le second terme du second membre, eu égard à la forte section du bloc, il vient plus simplement

$$4\pi m i \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{N} l}{\mu s}. \qquad (1)$$

Le flux $\mathfrak{N}$ est lié, d'autre part, à l'élongation α du galvanomètre par l'équation

$$\frac{n\mathfrak{N}}{r \times 10^{9} \times 10^{-1}} = \frac{\alpha}{K} e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}}, \qquad (2)$$

où n représente le nombre de spires de la bobine témoin, r la résistance en ohms du circuit galvanométrique, K la constante balistique rapportée au coulomb et λ le décrément logarithmique.

En faisant varier le courant d'excitation, estimé à l'aide d'un ampèremètre, on peut déduire de (2) les valeurs de l'induction $\mathfrak{B} = \mathfrak{N}/s$ et de (1) celles de la perméabilité correspondant à diverses valeurs de la force magnétisante $\mathfrak{H} = 4\pi m i / 10 l$.

Les fuites magnétiques, ainsi que la reluctance des joints et du bloc, introduisent dans les résultats ainsi trouvés des erreurs

qui peuvent s'élever à 30 pour 100. Il est à remarquer, en effet, que la masse de fer de la carcasse est peu aimantée, de sorte que μ' est faible.

La séparation des tronçons de l'éprouvette entraîne des manœuvres assez difficiles. M. Ewing a suggéré une méthode évitant également l'accumulation des erreurs et qui s'accommode d'éprouvettes en forme de barreau allongé, d'anneau ou de tige courte complétée par une masse de fer. Considérons, par exemple, la dernière hypothèse, qui convient à l'essai rapide des métaux pour carcasses de dynamos. La caractéristique du mode opératoire consiste en ce que, à la suite de chaque mesure, on revient au point initial A, fig. 214, voisin

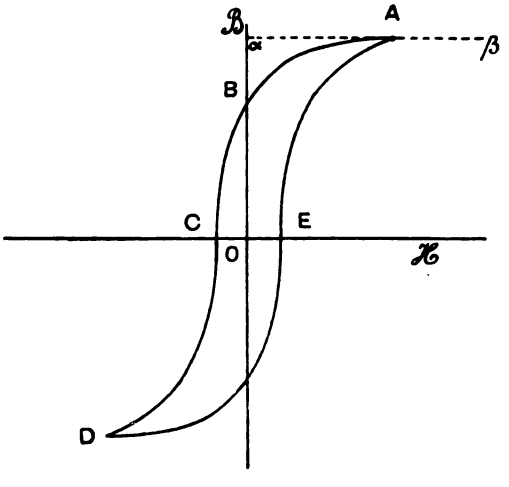


Fig. 214.

de la saturation, après avoir fait parcourir à l'échantillon un cycle complet d'aimantation. De la sorte, on ramène chaque fois l'éprouvette dans les mêmes conditions magnétiques. Il suffit de déterminer la courbe A B C D ; la courbe D E A peut être obtenue par symétrie.

Le courant magnétisant est fourni par une batterie d'accumulateurs B et évalué par un ampèremètre *a*, fig. 215. La variation du flux magnétique est estimée par la quantité d'élec-

tricité qu'elle induit dans une bobine témoin d' reliée à un galvanomètre balistique G. Celui-ci est étalonné à l'aide du flux développé par un solénoïde allongé b, autour duquel est enroulée une petite bobine auxiliaire d insérée dans le circuit du galvanomètre. c_1 représente un commutateur double à deux directions, permettant d'intervertir le sens du courant dans l'enroulement inducteur b' ; r_1 est une résistance convenable-

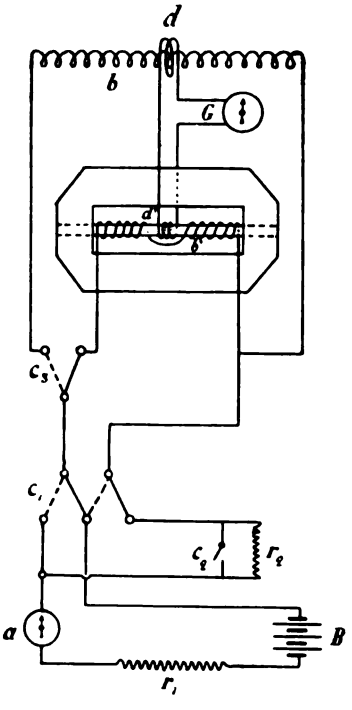


Fig. 215.

ment choisie et r_2 une résistance réglable pouvant être mise en court-circuit par la clef c_2.

Dans l'état des connexions indiqué, mais avec l'interrupteur ouvert, le courant d'excitation traverse r_1, a, c_2 et b'. Appelons I_m son intensité et supposons celle-ci capable de communiquer au barreau l'aimantation maxima correspondant au coude de la courbe du magnétisme. Ayant réglé la résistance

r_2, on ouvre brusquement c_2 : le courant magnétisant décroît et l'on observe au galvanomètre une élongation d'où l'on peut déduire la diminution du flux magnétique. On revient alors à l'aimantation initiale A, en faisant parcourir au système un cycle magnétique complet : pour cela, on déplace le commutateur c_1 vers la gauche, puis on le ramène à droite après avoir refermé c_2, de manière à donner au courant successivement les intensités $-\mathrm{I_m}$ et $+\mathrm{I_m}$. En répétant ces opérations avec des valeurs croissantes de r_2, on obtient des points de la partie AB de la courbe du magnétisme.

Pour trouver des points de la partie BD du diagramme, on procède comme suit, après avoir interverti les pôles de la batterie secondaire et placé le commutateur c_1 dans la position figurée en pointillé. On ouvre c_2, de façon à introduire r_2 en circuit au moment où l'on pousse c_1 à droite : on peut donner ainsi au courant toutes les valeurs comprises entre o et $-\mathrm{I_m}$. Les élongations correspondantes du galvanomètre sont proportionnelles aux ordonnées de la courbe comptées à partir d'une parallèle $\alpha\beta$ à l'axe des abscisses. On retourne au point A en fermant c_2 et en remettant ensuite c_1 sur les contacts de gauche.

L'axe des abscisses peut être tracé lorsqu'on a marqué les points symétriques A et D.

Les courbes obtenues sont très régulières, particulièrement pour les amplitudes faibles de l'aimantation, si l'on a soin de commencer par faire parcourir à l'échantillon plusieurs cycles, en manœuvrant c_1 de manière à alterner des courants d'intensités $+\mathrm{I_m}$ et $-\mathrm{I_m}$.

En vue de supprimer l'inexactitude due à la reluctance de la carcasse, M. Ewing a proposé la solution que voici, fig. 216. Les éprouvettes, au nombre de deux, sont réunies par des culasses de fer dont la reluctance totale est $\mathcal{R}'$ pour une induction $\mathcal{B}'$, de sorte que, dans le cas d'un écartement $l/2$ de ces armatures et avec des bobines magnétisantes comportant en tout m spires, on a

$$4\pi m i \times 10^{-1} = \mathcal{B}\frac{l}{\mu} + \mathcal{B}' s' \mathcal{R}'. \qquad (1)$$

En faisant une seconde expérience avec des bobines présentant moitié moins de spires et un écartement des culasses

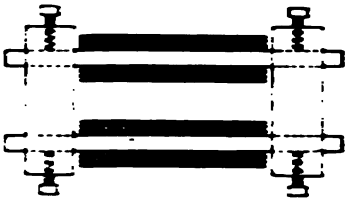


Fig. 216.

réduit également de moitié, on obtient, pour un même flux dans le circuit magnétique, c'est-à-dire la même élongation balistique,

$$\frac{4\pi \mathfrak{m} i'}{2} \times 10^{-1} = \mathfrak{G} \frac{s}{2\mu} - \mathfrak{G}' s' \mathfrak{R}'. \qquad (2)$$

Entre les équations (1) et (2) on peut éliminer le terme $\mathfrak{G}' s' \mathfrak{R}'$. Il vient ainsi

$$\mu = \frac{10\,\mathfrak{G} s}{4\pi \mathfrak{m} (2i - i')}.$$

Comme la réluctance des armatures n'est pas indépendante du flux, il faut deux expériences semblables pour chaque valeur de $\mathfrak{G}$, ce qui rend l'essai assez laborieux.

Lorsqu'un échantillon a été étudié exactement par le procédé ci-dessus, il peut servir à calculer les corrections à introduire dans la méthode de M. Hopkinson pour éviter les erreurs dues au bloc de fer. En effet, si l'on reprend la relation

$$4\pi \mathfrak{m} i \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{R} s}{\mu s} - \frac{\mathfrak{R}' s'}{\mu' s'},$$

on voit qu'il est possible de déterminer avec le barreau étalonné le terme $\mathfrak{R}' s' : \mu' s'$ correspondant à un flux donné et, par suite, de dresser une table des valeurs de ce terme pour les diverses valeurs de $\mathfrak{R} s = \mathfrak{G}$.

On doit à M. Drysdale un mode ingénieux d'application du principe de l'induction au contrôle des qualités magnétiques

d'une masse telle que la carcasse d'une dynamo. On creuse dans la masse M en question, fig. 217, une cavité à entrée

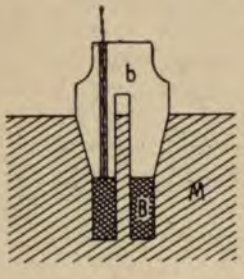


Fig. 217.

conique, à l'aide d'une fraise spéciale ménageant une tige axiale. On introduit dans le trou un bouchon b en fer terminé par une bobine double B, dont une partie sert à provoquer l'aimantation et l'autre à observer la quantité d'électricité induite. La force magnétomotrice absorbée par le bouchon et les joints peut être estimée au préalable en opérant sur une masse de nature connue. Néanmoins, l'imperfection des joints rend souvent les résultats de ce procédé assez peu exacts.

Méthodes d'atelier basées sur la force portante. Appareils de M. Thompson et de M. Du Bois. — La force portante d'un barreau aimanté est exprimée en fonction de l'induction magnétique, $\mathcal{B}$ gauss, et de la section, s cm², par la formule

$$p = \frac{\mathcal{B}^2 s}{8\pi} \text{ dynes.}$$

Si p est donné en grammes, on a donc, pour la perméabilité,

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi p \times 981}{\mathcal{B}^2 s}}. \qquad (1)$$

Pour utiliser cette relation, il suffit de dresser verticalement l'appareil de M. Hopkinson, ci-dessus décrit, et de séparer les deux tronçons de l'éprouvette en tirant sur l'un d'eux glissant à frottement doux dans la masse de fer extérieure. La valeur

de $\mathcal{H}$ est sensiblement égale à $4\pi/10$ fois le nombre d'ampères-tours par centimètre de l'enroulement magnétisant.

M. Sylv. Thompson a adopté le dispositif indiqué dans la fig. 218. Le barreau à essayer vient toucher, par son bout inférieur bien dressé, un bloc de fer fermant le circuit magnétique et l'on agit sur l'extrémité supérieure à l'aide d'une balance à ressort. Pour ne pas exercer de secousses capables de détacher prématurément le barreau, il convient, après avoir donné une certaine tension au ressort, de provoquer la séparation par une diminution progressive du courant magnétisant.

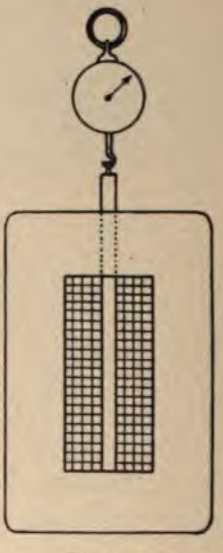


Fig. 218.

On remarquera que, d'après l'équation (1), l'erreur relative commise sur μ n'est que la moitié de celle qui entache b. Néanmoins, le procédé est peu exact. Non seulement on néglige la reluctance de la masse de fer enveloppant le barreau, mais il existe une grande incertitude quant à la surface réelle de contact du bout de celui-ci avec cette masse.

M. Du Bois a réalisé une autre combinaison, commode pour les essais industriels et dans laquelle la dernière cause d'erreur

est éliminée, fig. 219. L'éprouvette T, entourée d'une bobine magnétisante B, est glissée entre des pièces polaires P et P′ en fer. Le circuit magnétique est complété par une armature massive AA pivotant sur des couteaux disposés sur le côté. Une tare D sert à équilibrer le long bras du fléau. Les attractions magnétiques égales qui sollicitent les extrémités de l'armature tendent à faire basculer celle-ci vers la gauche, grâce à la différence des bras de levier. Un poids mobile, glissant le long d'une règle divisée EE, permet de maintenir l'équilibre. Le moment du poids est sensiblement proportionnel au carré de l'induction magnétique à travers l'échantillon. La graduation, faite empiriquement, est telle qu'on obtienne la valeur de cette induction en multipliant la lecture par la

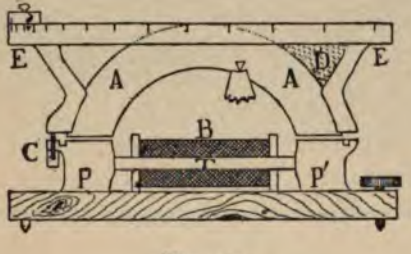


Fig. 219.

racine carrée du poids utilisé. Pour corriger l'erreur due aux pièces polaires et à l'armature, on porte, dans le tracé de la courbe du magnétisme, les abscisses à partir d'un axe curviligne dessiné sur une feuille transparente livrée avec l'instrument. Un tel appareil a l'avantage de pouvoir être mis entre les mains d'un ouvrier intelligent.

Méthodes basées sur la mesure d'un champ magnétique. Dispositifs de M. Brüger et de MM. Kœpsel et Kennely. — D'autres méthodes pratiques, à l'usage des ateliers, reposent sur l'insertion de l'éprouvette dans un circuit magnétique présentant un entrefer étroit, où l'on estime l'intensité du champ.

On peut, par exemple, comme le fait M. Brüger, former le circuit magnétique à l'aide d'un barreau à essayer droit et

d'une pièce en forme de C, en réservant un mince entrefer dans lequel est disposée une spirale de bismuth, qui permet d'évaluer le champ produit dans cet espace sous l'influence de l'enroulement excitateur agissant sur les noyaux. Si l'on gradue

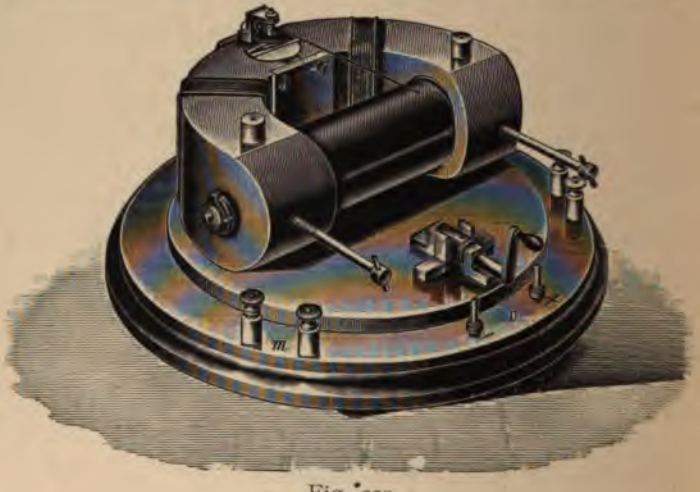


Fig. 220.

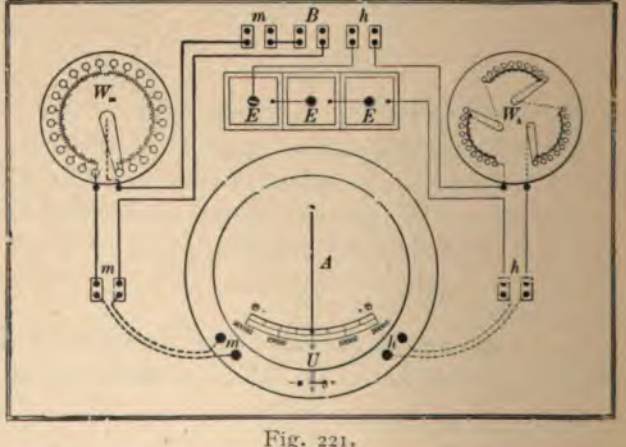


Fig. 221.

l'appareil avec un barreau type, on peut déduire de la variation de résistance électrique du bismuth la perméabilité de l'échantillon par rapport à celle de l'étalon. L'emploi du bismuth exige des intensités de champ assez fortes.

MM. Koepsel et Kennely mesurent le champ dans un entrefer analogue par le couple déviant exercé sur une bobine, semblable au cadre d'un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, mobile dans cet entrefer et parcourue par un courant d'intensité déterminée. Les fig. 220 et 221 montrent un modèle portatif d'instrument de ce genre construit par MM. Siemens et Halske. Le barreau à examiner, pourvu d'un enroulement magnétisant, forme un circuit magnétique avec deux masses de fer et un noyau cylindrique entouré de la bobine galvanométrique. Un rhéostat W_m est destiné à faire varier le courant d'excitation, qu'on évalue à l'aide d'un ampèremètre et dont un inverseur U permet de changer le sens. Un autre rhéostat W_h donne le moyen de graduer le courant que trois éléments secs E envoient dans le cadre galvanométrique; ce courant s'estime au moyen d'un milli-ampèremètre. Les spires disposées autour des masses de fer servent à neutraliser l'aimantation résiduelle de celles-ci.

Méthodes de compensation. Perméamètres de M. Ewing et de MM. Picou et Carpentier. — MM. Edison, Eickemeyer et Ewing ont imaginé des dispositifs de compensation pour la comparaison de la perméabilité d'une éprouvette avec celle d'un barreau de même forme étalonné, au préalable, par une méthode indirecte. Dans l'appareil de M. Ewing, les deux cylindres sont placés parallèlement, entourés de bobines magnétisantes semblables et emboîtés par les bouts dans deux culasses en fer identiques. Celles-ci sont munies d'appendices recourbés l'un vers l'autre et ménageant entre leurs extrémités un entrefer où pivote une aiguille aimantée. Quand on fait passer un courant dans les deux enroulements reliés en série, les culasses restent au même potentiel magnétique si les barreaux sont en même métal et aucun flux ne traverse alors le pont comprenant l'aiguille indicatrice. Mais, dans le cas où les barreaux sont dissemblables, un flux dérivé fait dévier l'aiguille et, pour rétablir l'équilibre, il faut diminuer le nombre de spires de l'une des bobines, en introduisant dans le circuit de celles-ci une résistance équivalente pour ne pas altérer le courant.

Le perméamètre de MM. Picou et Carpentier, fig. 222, utilise également un principe de compensation. Deux électro-aimants identiques, en fer à cheval, sont pressés contre une armature prismatique disposée suivant l'axe du système et formée par les tôles à essayer. Appelons B et B′ les bobines qui excitent les électro-aimants et désignons par b une bobine entourant l'armature. Si l'on envoie dans les enroulements B et B′ un courant produisant des forces magnétomotrices concourantes, on développe un flux $\mathfrak{N}$ dans les noyaux extrêmes, tandis que l'armature intermédiaire reste à l'état

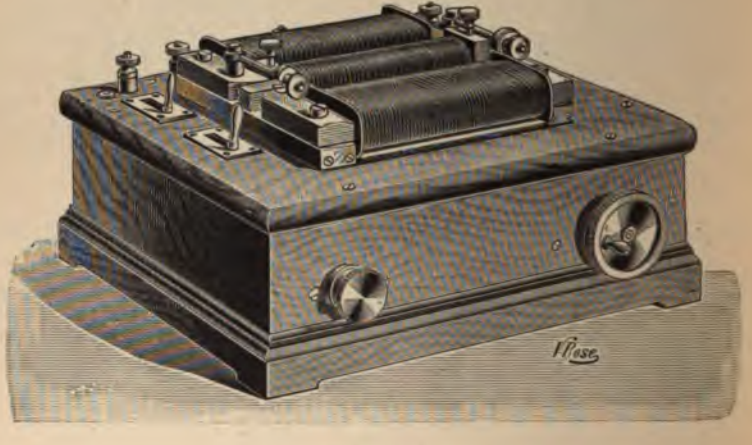


Fig. 222.

neutre. Si l'on renverse ensuite le sens du courant dans les spires B′ par exemple, les forces magnétomotrices des électro-aimants agissent en opposition et créent deux flux qui se réunissent à travers l'armature. A cause de la reluctance de celle-ci, ces flux sont inférieurs à $\mathfrak{N}$, mais on peut leur rendre cette dernière valeur en faisant passer un courant convenablement gradué dans la bobine b. Il est aisé de voir qu'on peut exprimer la reluctance de l'armature pour un flux donné, et partant la perméabilité correspondante, en fonction de la force magnétomotrice due à la bobine b.

Méthode du wattmètre pour la mesure de l'hystérésis. — Les courbes d'aimantation obtenues par quelques-unes des méthodes précédentes et notamment par celles basées sur l'induction sont susceptibles de résultats très précis et permettent de calculer la perte hystérétique par intégration graphique. La lenteur excessive avec laquelle les cycles magnétiques sont parcourus au cours de ces essais s'éloigne toutefois beaucoup des conditions rencontrées dans le fonctionnement des induits de dynamos et des transformateurs. On a imaginé des procédés rapides pour évaluer directement la perte par hystérésis d'un noyau en tôles de fer pendant que celui-ci est soumis à des forces magnétisantes alternatives dont la fréquence est de l'ordre de celle en jeu dans les appareils industriels susdits.

Enroulons, fig. 223, autour d'un anneau *a*, formé de tôles

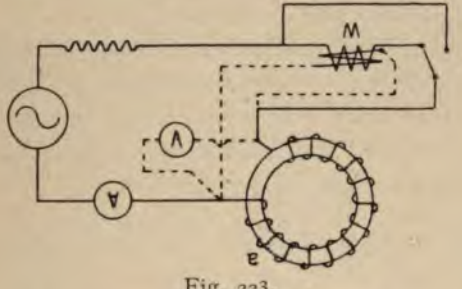


Fig. 223.

minces soigneusement isolées par du papier ou du vernis et ayant environ 20 cm de diamètre sur 1 cm d'épaisseur et 4 cm de largeur, un solénoïde continu et faisons passer dans les spires de celui-ci un courant alternatif sinusoïdal. Un voltmètre V sert à relever la différence de potentiel efficace aux bornes de l'enroulement, tandis qu'un wattmètre W mesure la puissance moyenne absorbée et qu'un ampèremètre A indique la résultante efficace des courants dans la bobine magnétisante et les circuits dérivés des instruments précédents. Il convient que le solénoïde ait peu de spires et soit traversé par un courant relativement intense, afin que le déphasage soit faible et l'erreur du wattmètre minime.

Toutes les quantités étant rapportées aux unités C. G. S., la

[illegible] la perte
[illegible] exprimée ordi-
[illegible] ou $\mathcal{B}$, est
[illegible] la perte
[illegible] nnelle aux
[illegible] $A \cdot \mathcal{B}_i^2 U$;
[illegible] de la bobine
[illegible] et le circuit
[illegible] sont respecti-
[illegible]

[illegible] Pour séparer les
[illegible] différentes qui
[illegible]

[illegible] que les électri-
[illegible] perte totale dans le
[illegible]

[illegible] aisément
[illegible] d'un voltmètre,
[illegible] dans n spires auxi-
[illegible] On aurait en effet, en appelant s
[illegible]

$$[illegible]$$

[illegible] est en général pas appli-
[illegible] de du flux est
[illegible] gauss.
[illegible] pas importante.

[illegible] pour calculer exac-
[illegible] change suivant une loi
[illegible] la bobine magné-
[illegible] le courant total lu à l'am-
[illegible] V — en phase avec la tension
[illegible] de la puissance totale P
[illegible] une valeur P', qui, divisée
[illegible] la puissance de la bobine
[illegible] dans l'hypothèse approchée d'ondes

sinusoïdales, le déphasage φ de I sur V. En soustrayant graphiquement de V la chute de tension ohmique IR, on a la force contre-électromotrice E induite dans la bobine magnétisante. Soit n le nombre de spires de celle-ci. L'induction variable $\mathcal{B}$ dans le fer est liée à la valeur instantanée e de la force électromotrice susdite par l'équation

$$e = -ns\frac{d\mathcal{B}}{dt},$$

d'où l'on tire

$$\int_0^{\frac{T}{2}} e\,dt = -\int_{+\mathcal{B}_0}^{-\mathcal{B}_0} ns\,d\mathcal{B},$$

c'est-à-dire

$$\mathcal{B}_0 = \frac{e_{moy}}{4nsf} = \frac{E}{4Knsf}.$$

Le rapport K de la force électromotrice efficace à la force électromotrice moyenne peut se trouver au moyen d'un oscillographe.

D'après l'expression approchée

$$w = \eta_i \mathcal{B}_0^{1,6} + Af\mathcal{B}_0^2, \qquad (1)$$

obtenue en divisant par la fréquence la perte totale de puissance dans l'unité de volume du fer, le diagramme des valeurs de w correspondant à une même induction maxima $\mathcal{B}_0$ en fonction de f devrait être une droite ayant pour ordonnée à l'origine $\eta_i \mathcal{B}_0^{1,6}$. L'expérience montre que le diagramme présente en réalité une courbure initiale accusant, pour une fréquence nulle, c'est-à-dire dans un cycle infiniment long, une perte par hystérésis qui diffère d'environ 5 pour 100 de celle résultant de l'hypothèse traduite par la formule (1). Cet écart, que l'on retrouve entre les résultats de l'intégration des courbes d'hystérésis relevées par les méthodes d'induction et ceux qui découlent de l'application de la méthode du wattmètre, peut s'expliquer par la viscosité magnétique du fer.

Suivant la convention allemande, il faut ramener la perte totale dans le fer à 30° C, ce qui exige la connaissance du

coefficient de variation du métal avec la température. On a vu toutefois qu'avec les tôles spéciales la correction de ce chef devient négligeable, à cause de leur grande résistivité et de leur faible coefficient de température.

Des essais comparatifs, effectués avec des appareils de dimensions diverses, ont montré que la méthode du wattmètre, convenablement corrigée des erreurs d'expérience, conduit à des résultats différant au plus de 3 pour 100 entr'eux.

Pour ne pas avoir à découper l'éprouvette en forme d'anneau, on constitue parfois le noyau d'un paquet A de poids déterminé, formé de bandes droites débitées dans la tôle à examiner, et d'un autre paquet B de plaques en U, servant dans tous les essais, fig. 224. Les éléments lamellaires sont

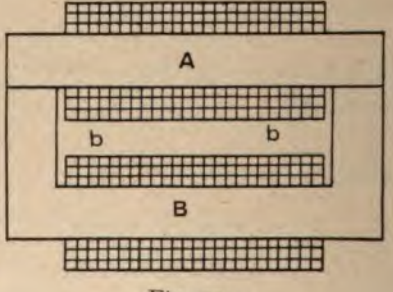


Fig. 224.

soigneusement isolés au papier ou au vernis, comme dans les transformateurs statiques. Des bobines magnétisantes *bb* sont raccordées à un alternateur donnant une courbe de courant sinusoïdale. On calibre au préalable l'appareil, en utilisant un paquet A en même fer que celui employé pour la carcasse B. La perte dans le fer se répartit alors entre les deux parties du noyau proportionnellement à leurs poids, ce qui permet de calculer la puissance correspondant aux tôles en U. En déduisant la valeur ainsi trouvée de la perte totale accusée par le noyau quand il comprend les tôles à essayer, on obtient la part qui revient à celles-ci. Cette disposition a l'inconvénient d'introduire des joints dans le noyau et de rompre la continuité de l'enroulement magnétisant. La reluctance des joints n'aug-

mente pas la dépense dans le circuit magnétique, puisque l'hystérésis de l'air est nulle; elle n'influe que sur le courant nécessaire pour réaliser l'induction maxima voulue. Mais les joints, de même que la discontinuité de l'enroulement, favorisent la dispersion du flux, qui se traduit par une force électromotrice d'induction supplémentaire dont il faut tenir compte dans un calcul précis.

M. Epstein, qui a proposé la règle de la perte totale, utilisait un circuit magnétique rectangulaire, formé de quatre paquets lamellés dont les bandes mesuraient 50 cm sur 3 cm et qui pesaient en tout 10 kg.

M. Richter a adopté un dispositif, fig. 225, qui se prête à

Fig. 225.

l'essai de tôles entières et fait ainsi connaître la perte hystérétique moyenne de celles-ci. Entre les parois planes d'un tambour en bois sont tendus, suivant les génératrices de deux surfaces cylindriques coaxiales, des conducteurs de cuivre nu, constituant une bobine annulaire de section rectangulaire très allongée. Cet enroulement comporte environ 120 spires et est interrompu sur une certaine longueur pour permettre l'introduction des tôles. Celles-ci, au nombre de 4 à 6 (environ 30 à 35 kg), sont guidées, à l'intérieur de la bobine, par deux rainures circulaires creusées dans les fonds du tambour. Leurs bords rectilignes, qui se recouvrent sur une faible longueur en formant un joint imbriqué, sont maintenus en place par

deux madriers de bois les empêchant de faire ressort vers l'extérieur. Pour des essais industriels, on se contente d'isoler les tôles par des bandes de papier pliées sur leurs bords circulaires; pour des mesures précises, on ajoute des feuilles de papier qui les séparent suivant toute leur surface, ainsi que des bandes entourant les bords parallèles à l'axe du tambour. Dans le premier cas, le joint se place entre les deux madriers de fixation et n'est pas serré; dans le second cas, il peut être comprimé sous un des madriers, pour diminuer la reluctance.

Tracé approché de la courbe du magnétisme à l'aide du wattmètre. — Les systèmes précédents convenant à l'emploi du wattmètre peuvent servir à dresser rapidement la courbe d'aimantation d'une manière approchée.

Supposons qu'avec un appareil à noyau circulaire, par exemple, on ait relevé la différence de potentiel efficace V volts aux bornes, l'intensité efficace I ampères, en retard d'un angle φ sur V, et la puissance moyenne absorbée $P' = VI\cos\varphi$ watts. La valeur efficace I_μ ampères du courant magnétisant vaut sensiblement $I\sin\varphi = \sqrt{I^2 - P'^2/V^2}$ et, avec V, elle détermine les amplitudes $\mathcal{H}_0$ et $\mathcal{B}_0$ de la force magnétisante et de l'induction. En effet, si l cm est la longueur moyenne de l'éprouvette, s cm² la section de celle-ci, n le nombre de spires de l'enroulement et f périodes par seconde la fréquence, on a approximativement

$$\mathcal{H}_0 = 4\pi\frac{n}{l} I_\mu \sqrt{2} \times 10^{-1} \text{ gauss} \quad \text{et} \quad \mathcal{B}_0 = \frac{V \times 10^8}{\sqrt{2}\,\pi f n s} \text{ gauss.}$$

En augmentant graduellement V et partant I, on peut donc réunir les éléments d'un diagramme montrant la dépendance de l'induction et de la force magnétisante.

Hystérésimètres. — On appelle hystérésimètres des instruments se prêtant à des essais rapides et pouvant être mis entre les mains d'agents subalternes. Dans ces appareils, on ramène ordinairement la mesure du travail d'hystérésis à celle d'un couple.

Dans le dispositif de M. Ewing, fig. 226, l'éprouvette consiste

en 6 à 8 tôles minces, de 7,5 cm de longueur sur 1,65 cm de largeur, serrées dans un support auquel on communique un

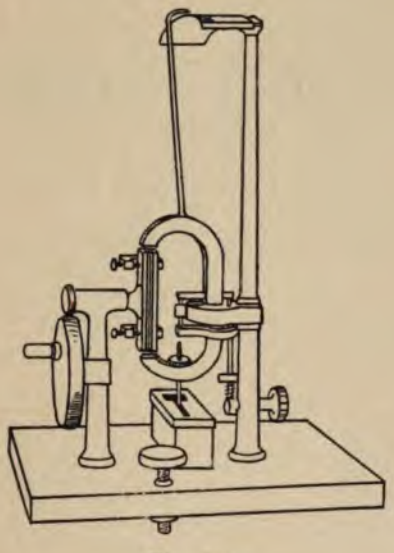


Fig. 226.

mouvement rotatoire grâce à une manivelle et des poulies de friction. Le flux magnétique est produit par un aimant, qui bascule sur des couteaux dont la ligne d'appui passe par l'axe de rotation de l'éprouvette. Si l'on admet que la seule perte en jeu est celle due à l'hystérésis, l'énergie absorbée par cette dernière doit être égale au travail mécanique dépensé, qui vaut en une révolution, c'est-à-dire par cycle, 2π fois le couple moyen développé :

$$W = 2\pi C.$$

Comme W et C sont indépendants de la vitesse, on peut faire tourner l'appareil à la main. Quand la période d'oscillation de l'aimant est assez grande relativement à la durée d'une révolution de l'éprouvette, l'aimant subit une déviation stable, dont la grandeur, lue sur une graduation, peut servir de mesure au travail cyclique de l'hystérésis. La rapidité du mouvement ne doit pas toutefois devenir telle que les courants de Foucault

induits dans le système tournant exercent une réaction appréciable sur l'aimant. Un contrepoids réglable, fixé à la partie inférieure de celui-ci, permet de modifier la sensibilité de l'instrument. Afin que le flux magnétique à travers l'échantillon essayé soit à peu près indépendant de la perméabilité de ce dernier, on a soin de ménager de grands entrefers, devant lesquels la reluctance de l'éprouvette est négligeable. L'aimant est proportionné de manière que l'induction magnétique atteigne environ 4000 gauss. L'expérience a montré que le poids et l'épaisseur de l'échantillon ne demandent pas un ajustement précis, pourvu que la longueur des bandes soit exacte. Chaque appareil est accompagné d'éprouvettes étalons et de tables donnant les pertes hystérétiques trouvées pour celles-ci par une méthode indirecte. En comparant la lecture correspondant à un des étalons à celle relevée avec l'échantillon étudié, on peut déterminer par une proportion l'énergie que l'hystérésis dissipe dans ce dernier par cycle quand l'induction oscille entre $\pm$ 4000 gauss. Les pertes sous d'autres inductions maxima se calculent en utilisant la formule connue

$$W = \eta_i \mathcal{B}_0^{1,6} U,$$

où U désigne le volume de fer de l'échantillon.

L'hystérésimètre de M. Ewing estime l'hystérésis alternative. Pour évaluer l'hystérésis tournante, en se plaçant dans des conditions analogues à celles rencontrées dans l'induit des dynamos, MM. Marcel Deprez et Blondel ont imaginé des hystérésimètres opérant sur des éprouvettes circulaires.

Dans l'appareil de M. Blondel, fig. 227, un anneau, formé des tôles minces à essayer, est porté par un arbre qui pivote entre pointes et est dirigé par un ressort en hélice. Une aiguille solidaire de l'arbre indique l'orientation de l'anneau. Un aimant en fer à cheval embrasse celui-ci et est mis en mouvement par une manivelle et des roues d'angle. L'instrument est dépourvu de zéro : on fait tourner l'aimant successivement dans les deux sens et on lit les angles α et α' repérant les positions d'équilibre correspondantes de l'anneau. Si c est le coefficient de torsion du ressort, on a, pour le travail de l'hystérésis par cycle,

$$W = 2\pi C = \pi c(\alpha - \alpha').$$

Le constructeur, M. Carpentier, joint à l'appareil, comme étalon de comparaison, une éprouvette dont le coefficient η_i de la loi de Steinmetz est connu.

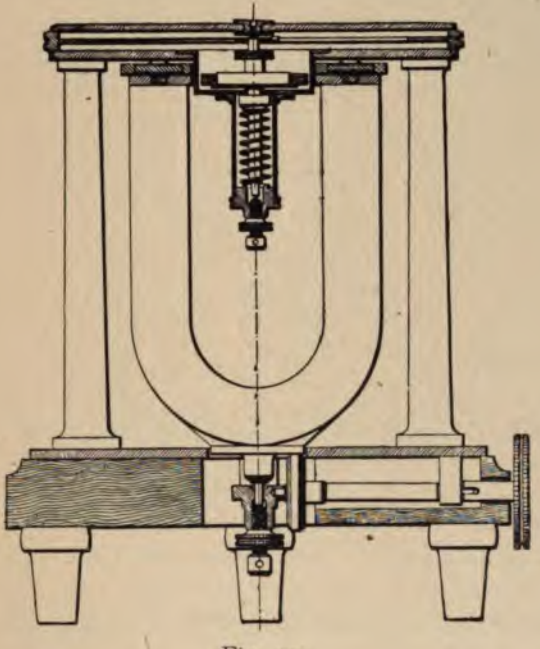


Fig. 227.

Nous rappellerons ici que les électriciens ne sont pas d'accord sur les grandeurs relatives des pertes par hystérésis alternative et par hystérésis tournante. On a pu démontrer récemment que les valeurs concordent sensiblement quand on corrige toutes les erreurs systématiques d'expérience. En fait, les nombres trouvés dépendent des méthodes employées ; il est donc utile de joindre l'indication du procédé à la mention des résultats.

APPLICATIONS.

Chapitre XX.

RÉSISTANCE DES GALVANOMÈTRES. (1)

Méthode du pont de Wheatstone. — La résistance du cadre d'un galvanomètre peut être déterminée par l'un des procédés exposés au chap. XII, par celui du pont de Wheatstone, par exemple, qui est susceptible d'une grande exactitude. On aura soin, si le galvanomètre à mesurer est très sensible, de caler l'equipage mobile pour ne pas détériorer l'appareil par l'action électromagnétique du courant servant à l'essai. La fig. 228 montre les connexions recommandées pour cette expérience. L'un élément de pile est relié à une boîte de résistances AA', sur une partie de laquelle est dérivé le pont. Les clefs de circuit 1 et 2 sont fermées successivement, puis ouvertes dans l'ordre inverse, pour éviter des extra-courants

(1) Les méthodes de mesure de la résistance des galvanomètres, ainsi que celles de la force électromotrice et de la résistance intérieure des piles, constituent d'excellents exercices pour permettre aux débutants de se familiariser avec les procédés de discussion des essais. Elles ont l'avantage de n'employer que des courants faibles, sans danger pour les opérateurs et les appareils.

dans le galvanomètre auxiliaire G. On opère les tâtonnements comme il a été indiqué dans l'étude de la méthode du pont, p. 298. On commence par déboucher une résistance r' minime, pour ne pas obtenir au début un courant trop intense. A

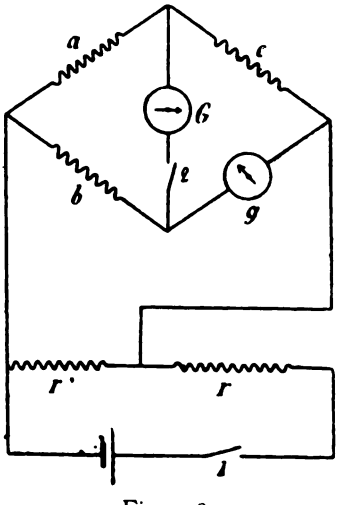


Fig. 228.

mesure qu'on approche de l'équilibre, on peut accroître r', en prenant la précaution de ne laisser les clefs abaissées que pendant le temps strictement nécessaire pour les observations, afin de ne pas échauffer les résistances du pont. On a vu plus haut comment s'estime l'erreur d'une telle mesure.

Méthode de la déviation réduite. — Lorsqu'on ne dispose pas d'un galvanomètre auxiliaire pour effectuer l'essai, on a recours à des procédés spéciaux.

Dans la méthode de la déviation réduite, on forme un circuit à l'aide du galvanomètre étudié, d'une boîte de résistances et d'une pile shuntée, au besoin, comme l'indique la fig. 229.

Si le shunt r' est assez faible pour que les variations de résistance dans la dérivation du galvanomètre ne changent pas d'une manière appréciable la différence de potentiel V à ses

extrémités, on a, en bouchant toutes les résistances de la boîte et en réglant le rhéostat en série avec la pile de façon à obtenir la plus grande déviation possible tout en évitant la polarisation,

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{V}{g}.$$

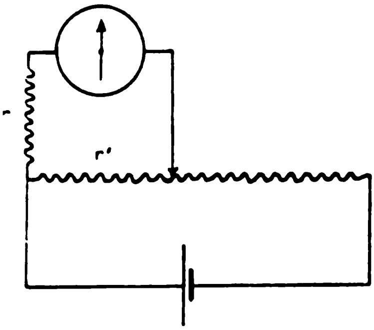


Fig. 229.

En débouchant ensuite dans la boîte une résistance r, il vient

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{V}{r+g};$$

d'où, par division des deux équations membre à membre,

$$g = \frac{\alpha' r}{\alpha - \alpha'}.$$

Il est aisé de vérifier que, pour réduire l'erreur relative limite [illegible] au minimum, il faut faire $\alpha/\alpha' = 2,4$.

L'inexactitude n'est pas sensiblement supérieure si l'on adopte le rapport $\alpha/\alpha' = 2$. La méthode porte alors le nom de [illegible] de la *demi-déviation*. Dans ce cas, la résistance [illegible] le shunt du galvanomètre dans la seconde expérience [illegible] choisie de manière à diminuer de moitié la déviation α lue d'abord, de sorte que, si la résistance r' du shunt de la pile [illegible] négligeable,

$$g = r$$

[illegible]

$$\frac{dg}{g} = 6\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

On voit que l'approximation dont la méthode examinée est susceptible n'est pas grande. Aux erreurs partielles de lecture peut encore s'ajouter celle provenant d'une polarisation éventuelle de la pile pendant les tâtonnements. D'ailleurs, la différence de potentiel aux extrémités du shunt n'est pas absolument la même dans les deux expériences. Si l'on appelle V et aV ses valeurs successives, a pouvant être calculé par l'application des lois de Kirchhoff, on arrive à la formule exacte

$$g = \frac{\alpha' r}{a\alpha - \alpha'}.$$

Dans cet essai, comme dans les méthodes de déviation en général, il est utile de prendre le zéro de la graduation à l'un des bouts de l'échelle galvanométrique, pour permettre d'accroître les déviations en vue de restreindre l'influence des erreurs de lecture.

Méthode d'égale déviation. — On met le galvanomètre à essayer en circuit avec une pile de force électromotrice E et une résistance r', de manière à obtenir une déviation α telle que

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{E}{r' + g}, \qquad (1)$$

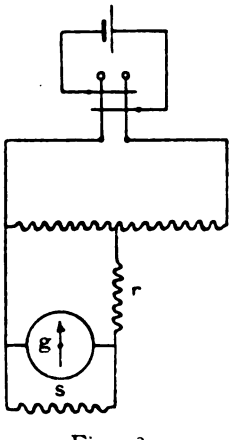


Fig. 230.

la résistance du générateur électrique étant supposée négli-

gerable. On shunte ensuite le galvanomètre et l'on ramène la même déviation en diminuant la résistance en série. Soient r la nouvelle valeur de cette dernière et s le shunt. On a

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{E}{r + \dfrac{gs}{g+s}} \frac{s}{s+g}. \qquad (2)$$

De (1) et (2) on déduit

$$g = \frac{s(r' - r)}{r}. \qquad (3)$$

Une erreur sur g peut provenir d'une erreur de réglage de la résistance r, déterminée elle-même par une erreur de lecture. On, d'après (3) et (2),

$$dg = -\frac{s r' \, dr}{r^2}, \qquad (4)$$

$$\frac{d\alpha}{k} = -E \frac{s}{s+g} \frac{dr}{\left(r + \dfrac{gs}{g+s}\right)^2} \quad \text{et} \quad \frac{d\alpha}{\alpha} = -\frac{dr}{r + \dfrac{gs}{g+s}}. \qquad (5)$$

En introduisant dans (4) la valeur de dr tirée de (5), on obtient

$$dg = \frac{s r'}{r^2} \left(r + \frac{gs}{g+s}\right) \frac{d\alpha}{\alpha},$$

de sorte que

$$\frac{dg}{g} = \frac{r'}{r(r' - r)} \left(r + \frac{gs}{g+s}\right) \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Enfin, en éliminant r entre la dernière égalité et (3), il vient

$$\frac{dg}{g} = \left(1 + \frac{s}{g'}\right)\left(1 + \frac{g}{r'}\right) \frac{d\alpha}{\alpha}. \qquad \text{(M. de Weydlich.)}$$

D'après cette équation, l'erreur relative dg/g est réduite par l'affaiblissement de s et l'augmentation de r'. Toutefois, il n'y a pas grand intérêt à choisir s beaucoup plus petit que g, car la somme $1 + \frac{s}{g}$ diminue assez lentement quand s devient inférieur à g, tandis que la déviation, qu'il faut chercher à rendre la plus forte possible, décroît au contraire très rapidement avec s. De même, il n'y a pas grand avantage à prendre

r' très supérieur à g. Cependant, on sera amené à adopter une valeur r' considérable si le galvanomètre est doué d'une sensibilité élevée. A défaut d'une résistance suffisante, on peut shunter la pile, fig. 230.

Quand s est assez faible par rapport à g et g par rapport à r', on trouve approximativement

$$\frac{dg}{g} = \frac{d\alpha}{\alpha},$$

ce qui montre la supériorité de la méthode en question sur le procédé précédent.

On peut, comme dans celui-ci, tenir compte par une correction du changement de tension aux extrémités du shunt éventuel de la pile. On doit alors écrire

$$\frac{V}{r' + g} = \frac{a V s}{r(s+g) + gs},$$

c'est-à-dire

$$g = \frac{s(ar' - r)}{r + (1-a)s},$$

au lieu de

$$g = \frac{s(r' - r)}{r}.$$

Pratiquement, le résultat de la mesure est influencé par le fait qu'on peut modifier r et r' de quantités dr et dr' sans faire varier d'une manière appréciable la déviation du galvanomètre. En supposant que les erreurs qui s'ensuivent s'ajoutent, on a, d'après (3),

$$dg = s\frac{r\,dr' + r'\,dr}{r^2}.$$

Méthode de Lord Kelvin. — Une pile, shuntée suivant la disposition ordinaire, fournit le courant à un pont de Wheatstone, dont le galvanomètre étudié occupe la branche de résistance inconnue, fig. 231. Les côtés a, b et c sont réglés jusqu'à ce que la déviation de l'appareil reste la même pour les deux positions de la clef insérée dans l'une des diagonales.

Suivant la propriété générale des combinaisons de circuits de l'espèce, on a alors

$$g = \frac{bc}{a}.$$

En discutant cette méthode, M. Kempe a reconnu qu'il faut choisir pour b une résistance aussi faible et pour a une résistance aussi forte que possible, la pile réunissant le point de jonction des côtés les moins résistants au point de jonction des

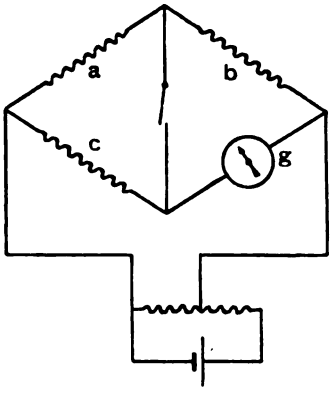


Fig. 231.

côtés les plus résistants et la déviation étant maxima. L'erreur entachant le résultat s'apprécie expérimentalement en recherchant entre quelles limites on peut dérégler le pont sans déterminer une différence sensible dans l'indication du galvanomètre. Pour admettre une grande déviation de l'équipage mobile, on considère l'une des extrémités de l'échelle comme zéro de la graduation. (1)

---

(1) Pour donner une idée de la précision relative des méthodes exposées dans ce chapitre, voici quelques résultats obtenus par un élève de l'Institut Montefiore, en opérant sur un galvanomètre qu'il avait construit :

Méthode du pont de Wheatstone dg/g	= 0,0004
Méthode de la déviation réduite	0,0204
Méthode d'égale déviation	0,0035
Méthode de Lord Kelvin	0,0017

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

Méthodes de déviation. — La mesure de la résistance des électrolytes présente une difficulté par suite de la polarisation des électrodes, qui occasionne un accroissement apparent de résistance. Il faut, si possible, faire l'essai avec une force électromotrice assez grande, pour diminuer l'influence de la polarisation. D'après MM. Lippmann et Paalzow, un métal ne se polarise pas dans une solution d'un de ses sels. De là, l'emploi d'électrodes dites impolarisables. On a souvent utilisé comme telles des lames de zinc plongeant dans des vases poreux remplis d'une solution concentrée de sulfate de zinc. On préfère actuellement le mercure en contact avec une solution de chlorure potassique saturée de calomel.

Pour éliminer l'effet de la polarisation, on peut recourir à la méthode suivante. L'électrolyte à essayer est versé dans un tube en U calibré. Les électrodes sont des rondelles transversales en même métal que celui du sel ou en platine platiné. On fait passer dans le liquide un courant mesuré par un galvanomètre. On rapproche les électrodes et l'on manœuvre un rhéostat, intercalé dans le circuit, de manière à rendre au courant son intensité première. La résistance ajoutée est égale

à la résistance de la colonne liquide supprimée. Pour recouvrir une électrode de platine d'un dépôt noir de ce métal, en vue de la rendre peu polarisable, on l'emploie comme cathode dans une solution aqueuse de tétrachlorure de platine, en augmentant convenablement la densité du courant. La résistance d'un électrolyte diminuant rapidement quand la température augmente, il est important de maintenir celle-ci constante pendant l'essai. Dans ce but, on dispose le tube dans un bain d'eau pourvu d'un thermomètre et l'on restreint autant que possible la durée de passage du courant. La résistivité de l'électrolyte étudié se déduit des dimensions du volume retranché.

Voici un autre procédé. En deux points de la colonne liquide comprise entre les électrodes, assez éloignés de celles-ci pour qu'on puisse admettre que le courant suit entr'eux des trajectoires parallèles à l'axe du tube, on fait arriver des fils de platine isolés sauf aux extrémités. On relève la différence de potentiel de ces dernières, à l'aide d'un électromètre ou d'un condensateur adjoint à un galvanomètre balistique. En comparant cette différence à la chute de tension occasionnée par une résistance métallique connue, intercalée dans le même circuit, on obtient la résistance limitée par les fils de platine.

Méthodes de zéro. Dispositifs de M. Bouty, de M. Kohlrausch, de MM. Ferrié et Carpentier. — M. Bouty a adopté un dispositif utilisant des électrodes impolarisables, qui consistent en solutions de sulfate de zinc reliées à la source électrique par l'intermédiaire de lames en zinc amalgamé. L'électrolyte à essayer est enfermé dans un tube en double hélice terminé par des coupes élargies et plongeant dans un bain à température constante. Les coupes communiquent par des siphons gros et courts avec des vases poreux, dont un seul est représenté dans la fig. 232 et qui sont remplis de l'électrolyte, comme les siphons. Les vases poreux sont placés dans des auges contenant le sulfate de zinc dissous et les plaques de zinc par lesquelles accède le courant. On observe la différence de potentiel au moyen d'un électromètre Lippmann, qui

est raccordé au liquide des auges et qu'on ramène au zéro par l'action compensatrice d'une dérivation prise sur un rhéostat

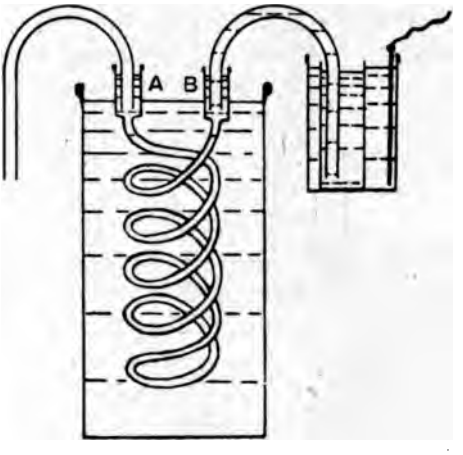


Fig. 232.

traversé par le courant d'une pile auxiliaire, fig. 233. La résis-

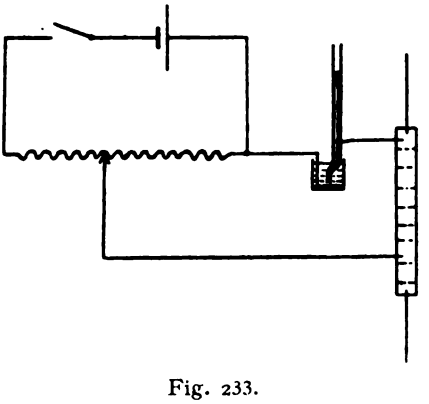


Fig. 233.

tance de l'électrolyte dans les coupes, les siphons et les vases poreux ne représente que la millième partie de celle de la colonne en hélice et peut donc être négligée.

Le plus souvent on fait usage, pour la mesure des résistances électrolytiques, de courants alternatifs à fréquence assez

élevée, de façon à rendre les phénomènes de polarisation insensibles. Le liquide examiné est ordinairement versé dans un tube courbe en verre d'Iéna, présentant des ouvertures élargies dans lesquelles se trouvent des électrodes en platine platiné, fig. 234. Le tube est mis dans un bain à température

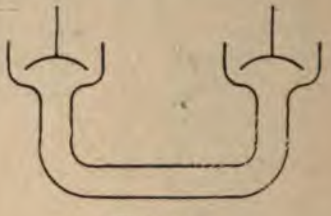


Fig. 234.

constante ou dans un thermostat. On détermine au préalable la constante propre aux dimensions du tube en essayant dans celui-ci une solution dont la résistivité a été évaluée par un procédé différent.

M. Kohlrausch se sert du pont de Wheatstone, en plaçant dans la diagonale qui contient habituellement la pile l'enroulement secondaire d'une bobine d'induction. Le galvanomètre est remplacé par un téléphone, qui rend un son aussi longtemps que le courant alternatif n'est pas annulé dans la diagonale qu'il occupe. Il faut avoir soin de constituer les côtés du pont par des conducteurs sans réactance, afin d'éviter tout accroissement apparent de leur résistance. La fig. 235 montre une

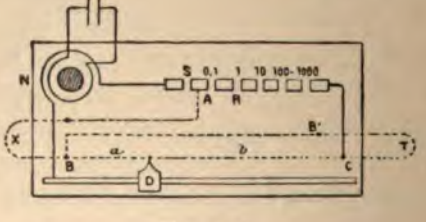


Fig. 235.

disposition de pont étudiée spécialement par M. Kohlrausch : les branches de proportion a et b sont prises sur un fil divisé

BC de 60 cm à 1 m de longueur, le long duquel glisse un contact à curseur D ; la branche de comparaison R est une boîte de bobines du genre Chaperon ou Feussner ; le téléphone se met en T et l'électrolyte en X. Ce procédé de mesure a l'avantage d'une grande rapidité ; sa précision dépend de l'acuité d'ouïe de l'observateur. La bobine d'induction ne peut pas être puissante, de crainte de polarisation. L'interrupteur automatique du circuit primaire doit produire un bourdonnement analogue à celui d'une mouche, pour l'obtention d'une bonne sensibilité au téléphone. Il convient que le récepteur soit à un mètre au moins de la bobine d'induction, pour ne pas être influencé directement par cette dernière. On cherche les deux positions du curseur pour lesquelles le son devient net et on adopte la lecture moyenne.

Il est possible de substituer au téléphone un électrodynamomètre sensible, de même qu'un appareil à induction du système Fleming ou Bellati. MM. Ferrié et Carpentier ont montré qu'on peut aussi utiliser un galvanomètre à aimant fixe, à la condition de disposer en série avec cet instrument une soupape électrolytique arrêtant la moitié des ondes du courant alternatif à déceler. Le détecteur électrolytique d'ondes hertziennes convient particulièrement pour cet office : il est constitué par un électrolyte dans lequel baignent inégalement deux fils de platine, l'un d'eux affleurant simplement le liquide ou pénétrant dans celui-ci à travers un tube en verre de façon à n'être mouillé que sur une surface très minime, et est polarisé par une pile formée de deux éléments secs en tension avec lui.

Il faut veiller, lors de la préparation des électrolytes, à ce que l'eau distillée employée comme dissolvant soit exempte d'anhydride carbonique, qui tend à s'y dissoudre et augmente la conductibilité des bains.

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Objet de la mesure. — Le circuit d'une ligne électrique aérienne ou souterraine se complète parfois par un retour par la terre, obtenu en reliant le conducteur, à ses deux extrémités, soit à des plaques métalliques plongeant dans l'eau ou le sol humide, soit à des conduites d'eau ou de gaz, soit à d'autres masses conductrices possédant de larges surfaces de contact avec la terre. La détermination de la résistance d'un tel retour offre la même difficulté que celle de la résistance des électrolytes, par suite de la polarisation que le courant d'essai occasionne aux plaques de terre. De plus, si ces plaques sont très distantes, on constate des *courants telluriques* variables, dus à l'inégalité des potentiels à la surface du globe et qui gênent les observations.

Les meilleures terres sont ordinairement les conduites d'eau. C'est à celles-ci qu'on se raccorde dans les laboratoires et les usines pour avoir un potentiel sensiblement nul. Les tuyaux des canalisations de gaz sont fréquemment assemblés par un mastic isolant.

Cas de deux lignes parallèles. — Soient deux lignes, de résistances r_1 et r_2, réunies aux mêmes plaques de terre. On

détermine, à l'aide du pont de Wheatstone par exemple, la résistance totale de la ligne r_1 et du retour par la terre, en considérant comme zéro du galvanomètre la déviation occasionnée par le courant tellurique et en adoptant une pile d'essai dont la force électromotrice est très supérieure à la différence de potentiel qui produit ce courant parasite. On trouve ainsi

$$R_1 = r_1 + x.$$

Une mesure semblable faite avec l'autre ligne donne

$$R_2 = r_2 + x.$$

Enfin, en bouclant les deux lignes aux extrémités, on obtient

$$R_3 = r_1 + r_2.$$

Des équations ci-dessus on tire

$$x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}.$$

Une seconde méthode consiste à envoyer par le sol sur l'une des lignes un courant I assez intense pour pouvoir être estimé par un ampèremètre et à relever, au moyen d'un voltmètre et de l'autre ligne, la différence de potentiel V entre la plaque de terre de la station où l'on opère et l'extrémité éloignée du premier conducteur. La résistance cherchée est

$$x = \frac{V}{I}.$$

Essai des terres d'un paratonnerre. — On met un paratonnerre en communication avec le sol par des plaques métalliques plongeant dans des puits distants d'au moins 10 mètres, afin d'être sûr de rencontrer une nappe souterraine d'une étendue et d'une conductibilité suffisantes. A défaut de puits, on enfouit les pièces de contact, plaques ou tuyaux, dans des fosses remplies de coke concassé. Le cas échéant, on utilise des conduites souterraines d'eau ou de gaz.

Voici comment on peut apprécier grossièrement la valeur de ces diverses terres. Appelons x, y et z les résistances de

contact de trois des prises de terre et négligeons la résistance du sol, ainsi que celle des fils de connexion. Par l'intermédiaire de ceux-ci, on détermine séparément, au pont de Wheatstone ordinaire ou à fil divisé,

$$R_1 = x + y,$$
$$R_2 = y + z,$$
$$R_3 = z + x.$$

De ces résultats on déduit

$$x = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2},$$
$$y = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2},$$
$$z = \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2}.$$

Chapitre XXIII.

RÉSISTIVITÉS ET RIGIDITÉS DIÉLECTRIQUES.

Résistivité des conducteurs. — Les résistivités s'expriment en microhms-cm pour les conducteurs, en ohms-cm pour les électrolytes et en mégohms-cm pour les isolants.

La détermination de la résistivité d'un conducteur est une des expériences qui se présentent le plus fréquemment à l'électricien, qu'il s'agisse soit d'un fil ou d'un câble aérien ou souterrain, soit de barres ou de fils utilisés à l'enroulement des électro-aimants et des dynamos.

L'essai comporte la mesure de la longueur l cm, de la section s cm^2 et de la résistance r microhms de l'échantillon fourni. La résistivité est, en microhms-cm, à la température à laquelle on a opéré,

$$\rho = \frac{r\,s}{l}.$$

Cette expression montre que, si l'on veut connaître la résistivité avec une approximation de 0,5 pour 100, les erreurs commises sur la résistance, le diamètre et la longueur doivent être inférieures à 0,125 pour 100, en admettant qu'il n'y ait pas d'erreur dans l'évaluation de la température.

Lorsque le conducteur à essayer est isolé, on commence par le dénuder en ayant soin de ne pas altérer sa section. Si la couverture est en coton ou en soie, on peut la dissoudre dans une solution de soude caustique.

L'estimation de la longueur se fait sur le conducteur redressé au préalable. Il ne faut pas étirer le fil, de peur de l'écrouir. Si l'échantillon est assez long, on peut, par exemple, mesurer une distance de quelques mètres sur un sol uni, à l'aide d'un mètre étalon, et étendre le fil suivant cette direction. Si l'échantillon est court, la longueur doit être évaluée avec beaucoup de soin, pour éviter une erreur relative importante. On emploie souvent dans ce cas, pour la détermination de la résistance, des appareils de mesure où le conducteur examiné est appuyé sur des couteaux dont l'écartement est exactement connu. Lorsqu'il s'agit d'une corde métallique, il faut opérer sur un brin détaché. Cependant, comme le redressement de ce brin exige un étirage, on se contente fréquemment d'indiquer la résistance d'une longueur donnée de la corde. La résistivité du cuivre doit, dans ce cas, être mesurée avant le câblage.

La section moyenne du conducteur se calcule aisément, comme on l'a vu au chap. II, si l'on connaît le poids spécifique du métal. Celui-ci s'obtient en pesant le fil d'abord dans l'air et puis dans de l'eau distillée. On fait bouillir cette dernière pour chasser les bulles adhérant au fil. Un autre procédé d'évaluation de la section consiste à effectuer, au moyen d'un micromètre ou d'une jauge, un nombre de mesures de diamètre suffisant pour avoir une moyenne satisfaisante.

Pour estimer la résistance, on a recours au pont de Wheatstone, au double pont de Kelvin ou à des méthodes analogues, suivant qu'on a affaire à une résistance moyenne ou à une résistance faible. Dans cette dernière alternative, il est indispensable que le raccordement au circuit de mesure ait lieu assez loin des extrémités du conducteur connectées aux fils d'alimentation pour qu'on puisse considérer les filets de courant comme parallèles à l'axe du conducteur dans la partie examinée. Il convient de souder les fils amenant le courant aux extrémités du conducteur à l'essai.

Pour permettre de calculer la résistivité à 0° C, il faut relever la température de l'échantillon pendant la mesure de sa résistance et déterminer le coefficient de variation de celle-ci avec la température. Le mieux est de placer le conducteur étudié dans un bain de pétrole porté à une température déterminée par un chauffage électrique, obtenu en noyant dans le liquide des résistances où l'on fait passer un courant électrique convenablement gradué. L'échauffement ainsi réalisé par effet Joule est uniformisé par un agitateur et évalué par un thermomètre très sensible plongeant dans le bain. En variant la température, il est possible de trouver le coefficient α de la formule suivante, où $t > t'$,

$$R_t = R_{t'} [1 + \alpha (t - t')].$$

Il est à remarquer que cette formule n'est applicable qu'aux environs de la température normale des laboratoires. Si la différence est notable, il faut ajouter entre les crochets un terme $\beta (t - t')^2$ et, pour les très grands écarts, encore un terme $\gamma (t - t')^3$.

Les résistances de comparaison ne nécessitent pas de correction pour la température si elles sont en manganine ou en un alliage analogue.

En vue d'éliminer l'influence de la température dans l'estimation de la résistivité du cuivre, on adopte souvent, comme étalon de comparaison, un fil de cuivre de résistance connue, qu'on laisse dans le même bain que l'échantillon examiné. On envoie un courant faible dans les deux conducteurs reliés en série et on compare les différences de potentiel aux extrémités de ceux-ci à l'aide d'un galvanomètre sensible de grande résistance. Soient V et V' les tensions correspondant aux deux conducteurs, dont ρ et ρ' sont les résistivités, l et l' les longueurs, s et s' les sections. On a, pour un courant I,

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{s}{l} \quad \text{et} \quad \rho' = \frac{V'}{I} \frac{s'}{l'};$$

d'où l'on tire

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{V}{V'} \frac{s}{s'} \frac{l'}{l}.$$

Si l'on observe les différences de potentiel entre deux couteaux séparés par un manche isolant et appuyés successivement sur les deux conducteurs, il vient

$$l = l'$$

et

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{V}{V'}\frac{s}{s'} = \frac{\delta}{\delta'}\frac{s}{s'},$$

δ et δ' étant les deux lectures au galvanomètre supposé proportionnel.

Quelques praticiens ont conservé l'habitude de spécifier la conductibilité des fils par rapport à celle d'un cuivre spécial étalonné par Matthiessen et considéré longtemps comme pur. Ce cuivre mesure 1,584 microhm-cm à 0° C, lorsqu'il est recuit. Actuellement, le commerce peut livrer du cuivre dont la conductibilité atteint 102 et même 103 pour 100 de celle du cuivre Matthiessen, ce qui montre l'inconvénient de ce mode de comparaison.

Résistivité des électrolytes. — La résistance, r ohms, d'un électrolyte de dimensions déterminées se mesure par l'une des méthodes exposées au chap. XXI. Si cet électrolyte présente une section constante le s cm^2 et une longueur de l cm, sa résistivité vaut

$$\rho = \frac{r\,s}{l} \text{ ohms-cm.}$$

La température a une importance considérable, par suite de la grande variation des résistances électrolytiques avec cet élément. La formule appliquée par M. Bouty aux solutions salines étendues est

$$R_0 = R_t(1 + 0{,}0337\,t),$$

t représentant des degrés centigrades.

Résistivité des diélectriques. — La résistivité du diélectrique d'un câble étant très élevée, sa valeur doit ordinairement se déduire de la résistance d'isolement d'une grande longueur de celui-ci. On verra dans un chapitre ultérieur avec

quelles précautions doit s'exécuter la mesure de cette résistance. Si R mégohms est la résistance d'isolement trouvée pour une longueur de l cm, lorsque l'enveloppe isolante a un diamètre extérieur de D cm et que le diamètre du conducteur vaut d cm, la résistivité du diélectrique est exprimée, en mégohms-cm, par

$$\rho = \frac{2{,}728\,R\,l}{\text{Log}\,\frac{D}{d}}.$$

Pour évaluer la résistivité d'un diélectrique en feuille mince, on peut procéder comme suit. L'épaisseur de la plaque à essayer ayant été calibrée, l'on applique en regard, sur les deux faces, des disques métalliques égaux et laissant déborder une large bande d'isolant pour réduire les dérivations superficielles. Le plateau supérieur est chargé d'un poids suffisant pour assurer l'adhérence avec le diélectrique. Celui-ci est alors soumis à une différence de potentiel élevée, qu'on obtient dans les laboratoires d'étalonnage par une batterie comportant plusieurs milliers de petits éléments secondaires. On relève simultanément, avec un électromètre et avec un galvanomètre très sensible, la différence de potentiel et l'intensité de courant entre les disques. Une vérification préalable doit être faite pour s'assurer qu'il n'y a pas de rupture du diélectrique pouvant compromettre le galvanomètre pendant l'essai. On note soigneusement la température et la durée d'électrisation de l'isolant. Dans une telle mesure, de grandes précautions doivent être prises pour éviter des dérivations de courant par les bords de la plaque diélectrique. Pour supprimer l'humidité, celle-ci peut être disposée sous une cloche contenant des matières desséchantes. Une bonne mesure est d'entourer le disque métallique connecté au galvanomètre d'un anneau de garde reposant sur le diélectrique et mis en communication avec le pôle de la pile relié au galvanomètre. Ainsi, le courant qui franchit le bord de la feuille isolante ne traverse pas ce dernier, mais retourne directement à la pile.

L'influence de la température est plus grande encore pour

les isolants que pour les électrolytes. La formule de correction est exponentielle. Pour la gutta-percha, on a, entre 0° et 38° C,

$$R_t = R_0 \times 0{,}894^t.$$

La résistivité de la gutta-percha étant représentée par 100 à 0° C après 1 minute d'électrisation, monte à 318 après 90 minutes; à 24° C, la variation n'est que de 5,5 à 7,66 dans les mêmes conditions de temps. Le papier imprégné de résine des câbles industriels est 30 fois moins résistant à 35° C qu'à 15° C.

Ces observations montrent qu'il est impossible d'atteindre une grande précision dans l'évaluation de la résistivité des isolants, laquelle est fonction, non seulement de la durée de passage du courant, mais aussi de la différence de potentiel appliquée. En forçant suffisamment cette dernière, on détermine un courant intense sous forme de décharge disruptive. Nous verrons ci-après qu'on préfère soumettre les isolants employés en électrotechnique à un essai de rigidité diélectrique.

Les recherches auxquelles ont donné lieu les matières radio-actives ont démontré l'influence considérable exercée par ces substances sur la résistivité des diélectriques, qu'elles diminuent dans des proportions remarquables. L'effluve électrique produit des effets analogues. Elle provoque de plus, au contact de l'air, la formation de composés nitrés, susceptibles d'altérer la composition de certains isolants en les rendant conducteurs.

Nous rappellerons, à ce propos, que c'est précisément en observant la diminution de résistivité de l'air en présence des eaux minérales qu'on étudie la radio-activité de celles-ci [1]. La méthode consiste, en principe, à faire arriver l'air, chargé de l'émanation sortant de l'eau expérimentée, à l'intérieur d'un électromètre que l'on charge et à noter la décroissance de la tension avec le temps. En répétant l'essai avec de l'eau distillée non radio-active, on peut déduire du rapprochement des résultats la part d'influence de l'émanation. La formule de la perte de charge permet, si l'on connaît la capacité du système, de

---

[1] Éric Gerard et Fontaine; *Bull. de l'Ass. des Ing. électr. sortis de l'Institut Montefiore*. Vol. 1906.

calculer la résistivité de l'air ionisé ou non. Ces expériences demandent des corrections délicates pour tenir compte de l'effet résiduel des récipients ayant contenu des substances radio-actives. On estime d'une manière analogue la radio-activité des solides et des gaz.

Rigidité diélectrique des isolants. — On s'est contenté longtemps de faire sur les diélectriques en usage dans les applications de l'électricité de simples mesures d'isolement. C'est ainsi que les isolateurs des lignes aériennes étaient soumis à une tension d'une centaine de volts appliquée entre l'intérieur et l'extérieur des cloches. A cet effet, celles-ci étaient renversées dans une cuve contenant de l'eau jusqu'à 2 cm environ de leur bord et de l'eau était également versée dans les isolateurs jusqu'au même niveau. Après 24 heures d'immersion, on reliait, par l'intermédiaire d'un galvanomètre taré, les pôles de la pile d'essai à des électrodes plongeant respectivement dans la cuve et dans les cloches. Les isolateurs accusant une perte trop accentuée étaient rebutés.

On a reconnu qu'il est plus avantageux de soumettre la porcelaine, et les diélectriques en général, à une tension alternative élevée, obtenue à l'aide d'un transformateur statique. Au moment de l'application de cette tension à un isolateur immergé comme ci-dessus, la buée recouvrant le bord de la cloche est volatilisée et, si la porcelaine présente une gerçure, le courant primaire atteint une intensité suffisante pour fondre le fil de sûreté intercalé dans le circuit inducteur.

Il faut remarquer que la rigidité diélectrique pour les hautes tensions n'est pas directement liée à la résistance d'isolement mesurée avec des différences de potentiel faibles. L'air, qui à la température ordinaire est un isolant pratiquement parfait pour la décharge conductive, résiste très mal à la décharge disruptive, la distance explosive croissant plus vite que la tension agissante.

Il est logique de contrôler la rigidité diélectrique des isolateurs, qui ont à subir les différences de potentiel élevées qu'occasionnent les décharges atmosphériques, ainsi que les surtensions provenant des ruptures de circuits inductifs.

Les transformateurs utilisés pour ces expériences sont noyés dans l'huile et leur tension secondaire peut être réglée grâce à un rhéostat variable introduit dans le circuit primaire. Aux bornes secondaires sont raccordées des pointes dont l'écartement, mesuré par une vis micrométrique, limite la différence de potentiel. La table suivante renseigne, pour diverses tensions sinusoïdales, les distances explosives dans l'air entre deux aiguilles opposées par les pointes.

Kilovolts efficaces.	*Cm.*	*Kilovolts efficaces.*	*Cm.*
5	0,57	60	11,8
10	1,19	70	14,9
15	1,84	80	18,0
20	2,54	90	21,2
25	3,3	100	24,4
30	4,1	110	27,3
35	5,1	120	30,1
40	6,2	130	32,9
45	7,5	140	35,4
50	9,0	150	38,1

Pour alimenter les transformateurs, il convient de choisir des alternateurs donnant autant que possible une courbe de force électromotrice sinusoïdale. Il faut avoir soin d'employer ces machines avec la même excitation que lors de la vérification de leur courbe à l'ondographe. En effet, si l'on réduisait le courant d'excitation, par exemple pour diminuer la tension primaire, il pourrait en résulter l'apparition d'harmoniques, par suite de la distribution nouvelle du flux dans l'entrefer.

Lorsqu'on doit produire des différences de potentiel secondaires de l'ordre de 100000 volts, il est prudent de raccorder l'alternateur à l'enroulement primaire du transformateur élévateur par l'intermédiaire d'un transformateur séparateur, dont le rôle est simplement d'introduire une barrière diélectrique supplémentaire entre le circuit à haute tension dangereuse et le circuit à basse tension de la machine génératrice. Une bonne mesure est d'enfermer en outre les transformateurs dans une cage grillagée, dont la porte commande le circuit d'alimenta-

tion, afin d'empêcher l'opérateur de faire fonctionner l'installation avant d'être sorti de la cage et d'en avoir fermé la porte.

La tension d'essai peut s'évaluer directement par des électromètres spéciaux, chap. XI. Si l'on ne possède pas de tels instruments, on estime la tension primaire avec un voltmètre ordinaire pour courants alternatifs, mais il faut alors avoir soin de vérifier le rapport de transformation en se servant de différences de potentiel réduites ou en subdivisant l'enroulement à haute tension. On cherchera à obtenir des variations périodiques sensiblement sinusoïdales, pour préciser le rapport entre l'amplitude et la valeur efficace de la tension. La mesure directe de la haute tension expose moins aux dangers des résonances, qui sont signalées immédiatement par une rapide augmentation de la déviation de l'électromètre.

Pour essayer les diélectriques en feuilles, on adopte des électrodes plates d'au moins 5 cm^2 de surface, à bords arrondis et appuyant, avec une pression d'environ 0,25 kg par cm^2, contre le milieu des feuilles desséchées au préalable. On note la température des feuilles. La tension d'expérience est maintenue pendant 1 à 5 minutes. On évite des essais de longue durée à des tensions supérieures à celles que les isolants doivent supporter en service, car l'échauffement par conductibilité ou par hystérésis diélectrique diminue la rigidité. Il faut toutefois remarquer que la température a bien moins d'influence sur celle-ci que sur l'isolement des diélectriques. C'est ainsi qu'un câble isolé au papier a sensiblement la même rigidité diélectrique à 0° et à 100° C, de même que les huiles pour transformateurs n'accusent pas un abaissement marqué de rigidité aux températures atteintes par ces appareils. Néanmoins, une action prolongée de la chaleur peut modifier certains isolants et provoquer une décharge disruptive. De plus, avec les tensions élevées, il se forme, dans le cas où de l'air est interposé sous les électrodes, des composés nitrés, dûs aux réactions de l'oxygène, de l'azote et de la vapeur d'eau sous l'influence de l'effluve électrique; de là, une altération des isolants de nature à réduire leur rigidité.

La gaine d'effluve, qui entoure un conducteur à haute ten-

sion, constitue d'ailleurs une extension de celui-ci dans l'espace. En soumettant des fils nus de diamètres très différents à des tensions croissantes, M. Jona a trouvé qu'à 196000 volts ils sont tous enveloppés d'une effluve de même épaisseur, qui leur donne des conductances comparables.

D'après M. Steinmetz, la distance explosive d peut être calculée, en centièmes de millimètre, par les formules ci-après, où la tension E est exprimée en kilovolts :

Mica	$d = 0{,}24\ E + 0.014\ E^2$,
Papier paraffiné	$d = 3\ E$,
Fibre	$d = 7{,}65\ E$,
Paraffine fondue Huile de lin cuite	$d = 12{,}4\ E$.

Voici, suivant divers expérimentateurs, les rigidités diélectriques, en kilovolts pour 1 mm d'épaisseur, de quelques isolants usuels :

Fibre	2,25		
Papier manille	2,2	à	2,9
Papier ordinaire	1,45	à	8
Leatheroïd	3,05	à	5,6
Carton de relieur	4,6	à	7,4
Coton vernis	10	à	21
Papier vernis	10,5	à	27
Gutta-percha	7,7	à	19
Caoutchouc	16	à	21
Ébonite	28,5	à	31,5

On aura égard, dans l'application de ces chiffres, à ce que la rigidité diélectrique croît ordinairement plus vite que l'épaisseur.

Rigidité diélectrique des câbles. — Il devient de pratique constante de soumettre les câbles industriels, lors de leur réception chez le fabricant et même après leur pose, à un essai de rigidité diélectrique sous une tension sensiblement supérieure à celle de service.

Pour les câbles qui doivent supporter normalement de 4000

à 5000 volts, on porte souvent la différence de potentiel d'expérience à l'usine au double, mais il serait dangereux d'étendre cette règle aux voltages très élevés.

Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que dans le diélectrique d'un condensateur cylindrique, tel qu'un câble armé simple, le potentiel ne varie pas uniformément, les tubes de force étant limités latéralement par des plans axiaux. En exprimant que le flux de force par unité de longueur suivant l'axe est constant dans un angle dièdre α, il vient

$$H\, r\alpha = -\frac{dv}{dr} r\alpha = K,$$

soit

$$-dv = \frac{K}{\alpha}\frac{dr}{r}.$$

Cette équation montre que la variation du potentiel dans l'isolant est proportionnelle, non à la variation du rayon, mais au rapport de cette dernière au rayon et qu'elle est, par conséquent, d'autant plus grande que le rayon est plus faible.

Par intégration, on obtient, pour la différence de potentiel V entre les parois extrêmes du diélectrique, correspondant à des rayons r_1 et r_2,

$$V = \frac{K}{\alpha}\log_e\frac{r_2}{r_1},$$

de sorte que la différence de potentiel par unité de longueur radiale à la distance r vaut

$$-\frac{dv}{dr} = \frac{1}{r}\cdot\frac{V}{\log_e\frac{r_2}{r_1}}.$$

De l'application de la dernière formule à un câble dont le conducteur a 6 mm de diamètre et est recouvert de 14,5 mm d'isolant, il ressort qu'avec une tension d'essai de 25000 volts le diélectrique supporte environ 5000 volts par mm près du cuivre et 800 volts par mm près de l'armature.

On voit, par ce qui précède, le danger de soumettre à des tensions considérables des câbles à conducteurs minces.

M. Jona a trouvé expérimentalement que, pour un fil de 0,1 mm de diamètre isolé par 7 mm d'épaisseur de caoutchouc, celui-ci est percé à 10000 volts, tandis que, pour un fil de 1,4 mm de diamètre entouré de la même épaisseur d'isolant, ce dernier ne cède qu'à 20000 volts. Semblablement, un câble présentant 1 mm de cuivre et 14 mm de papier est percé à 40000 volts, tandis que, si le cuivre a 16 mm, la même couverture isolante résiste jusqu'à 75000 volts.

On conçoit également qu'on puisse arriver, pour un câble de composition déterminée, à une tension limite à laquelle aucune épaisseur de l'isolant ne résiste : c'est lorsque la différence de potentiel par mm au contact du conducteur dépasse la tension critique du diélectrique en jeu.

Les considérations ci-dessus indiquent l'utilité d'employer contre le cuivre des câbles à haute tension un isolant à grande rigidité diélectrique, tel que le caoutchouc ou le mica, le papier pouvant être mis en œuvre pour compléter la couverture. On arrive cependant, avec le papier imprégné de certaines huiles et résines, à fabriquer des câbles capables de travailler à 20000 volts et pouvant être essayés au double de cette tension. Il faut éviter d'enrouler ou de dérouler ces câbles à des températures plus basses que 8 à 10° C, parce que, dans ces conditions, ils deviennent cassants et sont susceptibles de se gercer.

Chapitre XXIV.

ESSAIS GÉNÉRAUX DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Mesure de la résistance d'un câble à l'usine. — Les cahiers des charges concernant les câbles électriques spécifient la résistance kilométrique du conducteur à une température donnée. Si le câble en question est pourvu d'une gaine imperméable, l'essai se fait après en avoir immergé une longueur connue dans une cuve, dont on maintient l'eau à une température constante pendant 24 heures, afin que l'équilibre de température s'établisse à travers la couverture isolante. La mesure s'effectue au pont de Wheatstone, par exemple, en ayant soin de déterminer la résistance des fils de connexion avant et après l'expérience, dans le but d'en déduire la valeur moyenne du nombre total obtenu. On corrige convenablement le résultat pour le ramener à la température prescrite. S'il s'agit d'un gros conducteur composé de brins tordus, on le soude aux fils de connexion et l'on évalue, par le double pont de Kelvin ou une méthode équivalente, la résistance entre deux sections assez éloignées des raccords pour permettre la supposition que le courant est uniformément réparti dans le tronçon examiné.

Résistance d'une canalisation posée. — Deux alternatives peuvent se présenter dans la mesure de cette résistance : 1) il existe plusieurs conducteurs entre les points extrêmes ; 2) il n'y a qu'un seul conducteur et le retour se fait par le sol, ce qui est le cas des longues lignes sous-marines.

Cas de plusieurs conducteurs. On forme un circuit métallique en bouclant deux des conducteurs à l'un des postes terminaux et l'on détermine la résistance de ce circuit, en connectant les deux bouts disponibles aux appareils de mesure par des fils de liaison dont la résistance doit être déduite de la valeur trouvée. Avec les gros câbles, il faut soigner spécialement les raccords, pour rendre la résistance des contacts négligeable.

Si l'on dispose de trois conducteurs, on peut faire trois combinaisons de ce genre, dont les résultats permettent de calculer la résistance individuelle de chacun d'eux.

Une telle expérience est forcément moins précise qu'un essai à l'usine : on ne peut, en effet, faire la correction pour la température, attendu que cette dernière n'est pas connue.

On a précisément recours à l'essai d'un câble posé pour estimer la température moyenne de celui-ci, essayé au préalable à l'usine. On applique alors la formule

$$R_{t'} = R_t \{ 1 + \alpha (t' - t) \},$$

où t' est la seule inconnue. La connaissance de cette température donne le moyen de faire la correction relative à la résistance d'isolement du câble, laquelle est beaucoup plus fortement influencée par la température que la résistance du conducteur.

Cas d'un conducteur unique. Quand on ne dispose que d'un seul conducteur entre les deux postes extrêmes, il est nécessaire de compléter le circuit par la terre, en reliant le conducteur d'une part aux instruments de mesure et d'autre part au sol. On fait ainsi intervenir dans le résultat la résistance du retour par la terre, peu importante si la ligne est longue.

Supposons qu'on ait recours au pont de Wheatstone, qui est l'appareil le plus usité pour ce genre de mesures. Une difficulté surgit du fait des courants telluriques correspondant

aux différences de potentiel qui se manifestent entre les divers points du globe. Les forces électromotrices qui donnent naissance à ces courants ne dépassent généralement pas quelques volts et ne varient que très lentement, sauf pendant les orages magnétiques, où elles peuvent atteindre des centaines de volts et changer très rapidement. Des forces électromotrices dues à la polarisation des plaques de terre entrent aussi en jeu, mais elles sont inférieures à 1 volt. Pour tenir compte de ces causes perturbatrices, on traite la ligne comme une résistance contenant une force électromotrice, en opérant d'après un procédé désigné sous le nom de *méthode du faux zéro*. On considère la déviation galvanométrique, occasionnée par le courant tellurique avant l'abaissement de la clef de la pile, comme zéro de l'échelle et l'on règle les côtés du pont de manière à maintenir l'index dans cette position. Il convient d'employer une source électrique assez forte, de 50 à 100 éléments Daniell par exemple, afin de réduire l'effet relatif des forces électromotrices parasites. On ne ferme la clef du galvanomètre que 10 à 20 secondes après celle de la pile, pour éviter l'influence sur l'instrument du courant de charge du câble examiné. Pour plus d'exactitude, on répète l'expérience après avoir permuté les pôles de la pile, ce qui intervertit le sens du courant d'essai dans la ligne, et l'on prend la moyenne des résultats obtenus.

Un moyen de neutraliser les forces électromotrices de la ligne consiste à intercaler dans celle-ci quelques éléments voltaïques dont on fait varier la tension aux bornes, à l'aide d'un rhéostat en dérivation, de façon à introduire dans le circuit une différence de potentiel égale et opposée à ces forces électromotrices. On vérifie si l'effet cherché est atteint en observant le galvanomètre, qui ne doit pas dévier avant le raccordement de la pile du pont.

Dans une méthode suggérée par M. Black, on laisse les branches de proportion et de comparaison du pont invariables et on effectue le réglage en agissant sur une résistance mise en série avec la ligne. Si les branches de proportion sont égales, la résistance A de la branche de comparaison fait équi-

libre à la résistance auxiliaire r, à la résistance L de la ligne et à la résistance apparente e/i introduite par les forces électromotrices parasites. Après renversement du courant de la pile d'essai, il faut une nouvelle résistance auxiliaire r', le sens relatif des forces électromotrices susdites étant changé. Des relations

$$A = r + L \pm \frac{e}{i} = r' + L \mp \frac{e}{i},$$

correspondant aux deux expériences, on tire

$$L = \frac{2A - r - r'}{2}.$$

Souvent on est gêné par des courants vagabonds, dus à des installations de tramways ou autres et qui, à l'inverse des courants telluriques, varient très rapidement en rendant les mesures difficiles.. M. Devaux-Charbonnel utilise la méthode de déviation suivante pour lever la difficulté, fig. 236. Au

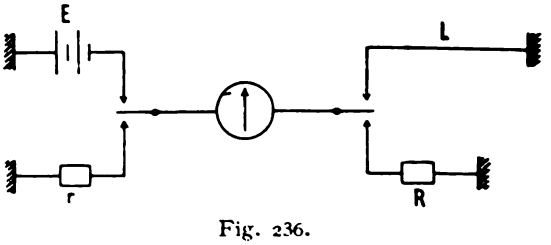


Fig. 236.

moyen d'un galvanomètre à lecture rapide, on observe le courant produit dans la ligne étudiée par la force électromotrice E d'une pile de résistance r et les forces électromotrices perturbatrices $\pm e$:

$$I = \frac{E \pm e}{L + g + r} = \frac{\alpha}{k}.$$

En reliant ensuite la ligne à la terre par le galvanomètre et un rheostat r substitue à la pile, on note un courant

$$i = \frac{\pm e}{L + g + r} = \frac{\alpha'}{k}.$$

S'il n'y avait pas eu de forces électromotrices parasites, on aurait constaté en premier lieu un courant

$$\frac{E}{L+g+r} = I - i = \frac{\alpha - \alpha'}{k}.$$

Or, ce courant peut être reproduit en remplaçant la ligne par une résistance R occasionnant au galvanomètre la déviation $(\alpha - \alpha')$ et dont la valeur est, par suite, égale à L. Il convient d'opérer vite et de répéter l'essai un certain nombre de fois, pour arriver à une approximation satisfaisante.

La résistance déterminée par les procédés ci-dessus est, en réalité, une combinaison de la résistance cherchée et de la résistance d'isolement. Dans l'hypothèse d'une résistance d'isolement par unité de longueur constante, on peut trouver la valeur exacte de la résistance du conducteur par la résolution des équations différentielles

$$-\frac{dV}{dx} = I\, r_c \quad \text{et} \quad -\frac{dI}{dx} = \frac{V}{r_i},$$

où V et I désignent le potentiel et le courant à la distance x de l'origine du câble, r_c et r_i étant les valeurs unitaires de la résistance du conducteur et de la résistance d'isolement. Si l'on représente par R_c et R_i la résistance totale du conducteur et la résistance d'isolement globale fournies par les mesures, et par R'_c et R'_i les valeurs réelles de ces quantités, on obtient les relations

$$R'_c = \frac{\sqrt{R_c R_i}}{2} \log_e \frac{\sqrt{R_i} + \sqrt{R_c}}{\sqrt{R_i} - \sqrt{R_c}},$$

$$R'_i = \frac{2\sqrt{R_c R_i}}{\log_e \dfrac{\sqrt{R_i} + \sqrt{R_c}}{\sqrt{R_i} - \sqrt{R_c}}}.$$

On se contente ordinairement des expressions simplifiées

$$R'_c = R_c\left(1 + \frac{1}{3}\frac{R_c}{R_i}\right), \qquad R'_i = R_i - \frac{R_c}{3}. \qquad \text{(M. Hockin.)}$$

Isolement des lignes aériennes. — On définit, sous le nom de résistance d'isolement d'une canalisation, la résistance existant entre le conducteur et la terre. Elle est en raison inverse du développement de la ligne, de sorte que, pour conserver un taux de perte constant, l'isolement par unité de longueur doit croître avec l'étendue de celle-ci.

L'isolement des canalisations aériennes ou souterraines à conducteurs nus varie fortement avec l'état hygrométrique de l'air, à cause de la buée plus ou moins abondante qui se dépose sur les isolateurs. Dans une atmosphère très humide, il tombe souvent en dessous de 1 mégohm par kilomètre.

L'isolement se mesure par l'une des méthodes convenant à l'évaluation des grandes résistances. Quand l'isolement est très élevé, on adopte ordinairement la méthode de déviation, en observant la déviation occasionnée par le courant de perte dans un galvanomètre sensible et gradué au préalable, qu'on intercale entre la pile d'essai et l'une des extrémités de la ligne isolée à l'autre bout. On prend la moyenne arithmétique des valeurs trouvées avec des courants de sens contraires. Si la résistance d'isolement n'est pas très considérable, on peut recourir au pont de Wheatstone pour son estimation.

Isolement des câbles à la gutta-percha. — L'isolement des câbles télégraphiques souterrains et sous-marins, isolés à la gutta-percha, doit être vérifié méticuleusement, pour éviter les grandes dépenses qu'occasionnent les réparations des lignes défectueuses.

Les âmes, formées de conducteurs en cuivre recouverts de gomme isolante, sont fabriquées par bouts de 500 m à 3000 m. L'essai à l'usine n'a lieu qu'une quinzaine de jours après la fabrication, afin de laisser à la gutta-percha, dont la résistivité a diminué pendant le travail, le temps de reprendre ses qualités. Les tronçons à essayer sont lovés dans des cuves qu'on remplit d'eau maintenue, par des jets de vapeur, à 24° C pendant 24 heures. Il faut ce temps pour assurer l'établissement de l'équilibre de température à travers l'enveloppe mauvaise conductrice de la chaleur.

La mesure de l'isolement s'effectue par la méthode et sous la tension spécifiées au cahier des charges, les résultats obtenus variant avec les conditions d'expérience. Une force électromotrice assez grande est nécessaire pour déceler les gerçures, qui ne se manifesteraient pas avec une tension réduite, et pour rendre les effets de polarisation négligeables.

Généralement, on a recours à la méthode de déviation, en utilisant une pile de plusieurs centaines de volts.

On commence par étalonner le galvanomètre convenablement shunté, en s'aidant d'un seul élément et d'une boîte de résistances de 10000 à 100000 ohms. On détermine d'ailleurs le rapport de la force électromotrice de cet élément à celle de la batterie entière, d'après les élongations d'un galvanomètre balistique dans lequel on décharge un condensateur chargé successivement à l'aide de ces deux forces électromotrices ; les élongations sont rendues comparables par l'emploi de shunts et l'on a soin de faire les corrections que ceux-ci nécessitent, chap. VI.

On connecte ensuite, par l'intermédiaire d'une clef d'inversion, l'un des pôles de la pile à l'eau de la cuve, tandis que l'autre pôle est relié au conducteur du câble à travers le galvanomètre, qu'on protège par une clef de court-circuit permettant d'éviter le passage dans l'appareil du courant de charge initial, fig. 237.

Le plus grand soin doit être apporté à l'isolement des instruments, de la pile et des fils de connexion. Les clefs et les bornes d'attache doivent être montées sur des colonnes en ébonite. L'isolement des fils de raccordement est contrôlé par une mesure préalable et l'on corrige, s'il y a lieu, l'erreur qu'ils introduisent dans le résultat cherché. Il faut empêcher qu'il puisse se produire une déperdition de courant par des couches d'humidité faisant communiquer les extrémités dénudées du câble avec l'eau de la cuve. On rafraîchit ces extrémités en taillant la gutta-percha à l'aide d'un canif et on les enduit de paraffine. On peut aussi enrouler autour des bouts de la gaine isolante un fil métallique attaché, d'autre part, à la borne du galvanomètre en contact avec la pile : ainsi, le cou-

rant dérivé par la surface de la couche diélectrique ne passe pas à travers le galvanomètre. Il convient de disposer ce dernier comme l'indique le schéma et de ne pas l'intercaler entre la clef d'inversion et la cuve, car, les couples voltaïques n'étant jamais parfaitement isolés, leur courant de perte augmenterait dans ce cas la déviation de l'instrument.

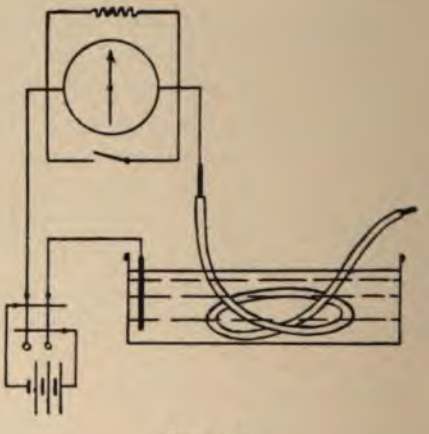


Fig. 237.

Après avoir maintenu la clef d'inversion abaissée pendant 10 à 20 secondes, on ouvre la clef de court-circuit. Le shunt du galvanomètre est réglé de manière à obtenir une déviation convenable. On effectue la lecture après 1 ou 2 minutes d'électrisation. Ce sont là les durées le plus souvent imposées dans les cahiers des charges. Si l'on prolonge l'expérience pour juger de l'absorption du câble, on constate que la déviation galvanométrique va en décroissant de moins en moins vite jusqu'à une valeur fixe. On ferme ensuite la clef de court-circuit et relève la clef d'inversion de façon à laisser le câble se décharger; après quoi l'on renouvelle l'essai en renversant le sens du courant. On adopte la moyenne des observations. Les déviations à faire intervenir dans le calcul de la résistance d'isolement sont celles notées après 1 ou 2 minutes d'électrisation. Pour la correction de température, on s'aide de la formule donnée au chap. XXIII.

La mesure de l'isolement d'un câble après la pose s'opère par un procédé semblable au précédent, mais elle est moins précise par suite de l'incertitude concernant la température moyenne du câble. On ne peut guère estimer celle-ci qu'en comparant la résistance du conducteur posé à la résistance trouvée à l'usine pour une température connue. Quand on contrôle l'isolement d'un câble sous-marin immergé, on se contente d'une pile développant 20 à 30 volts. On tient compte du courant tellurique passant à travers la couverture de gutta-percha en prenant la moyenne des résultats correspondant à des courants d'essai de sens inverses.

La résistance d'isolement d'un câble à la gutta-percha est fonction, non seulement de la force électromotrice appliquée et de la température, mais encore de la pression à laquelle le diélectrique est soumis. Elle augmente à mesure que le câble s'enfonce plus profondément dans l'eau, parce qu'ainsi la température diminue et la pression croît. Son évaluation par des moyens autres que celui ci-dessus décrit, par la méthode de perte de charge par exemple, peut conduire à des chiffres différents, pour les raisons développées au chap. XXIII. C'est pourquoi il est nécessaire d'indiquer, en même temps que la valeur obtenue, le procédé employé et les conditions d'expérience.

Il est à remarquer que, dans la formule de la perte de charge appliquée à un câble, le temps ne dépend pas des dimensions de celui-ci, mais seulement de la résistance et de la capacité spécifiques du diélectrique. Avec la gutta-percha à 24° C, la décharge de moitié correspond à 100 secondes environ et l'expérience prouve que la résistance d'isolement obtenue par la méthode de perte de charge est sensiblement la même que celle accusée par la méthode de déviation si l'on considère le temps nécessaire pour que le câble perde un tiers de sa charge, pourvu toutefois que cette durée soit comprise entre 1 et 2 minutes, condition qu'on peut remplir au besoin en introduisant une perte additionnelle connue.

Isolement des joints des câbles. — La résistance d'isolement d'un joint ordinaire de câble à la gutta-percha se rap-

proche d'un million de mégohms, de sorte que la vérification de cette grandeur exige des dispositifs de mesure spéciaux.

Le plus souvent, les cahiers des charges spécifient que l'isolement d'un joint doit être équivalent à celui de 2 m de câble et que la comparaison doit être faite, par la *méthode d'accumulation,* avec une pile de 200 éléments au sulfate de cuivre.

Pour opérer le contrôle, les deux rouleaux de câble réunis sont soigneusement isolés et leur jonction est plongée dans une cuve suspendue à des lanières de caoutchouc en vue d'assurer son isolement. Le circuit comprend la pile d'essai, une clef d'inversion, un condensateur, le conducteur du câble et une électrode métallique plongeant dans l'eau de la cuve, fig. 238. Le condensateur peut ainsi se charger de la quantité

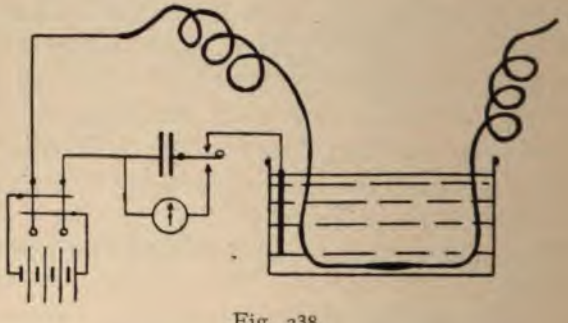


Fig. 238.

d'électricité qui filtre à travers le joint. L'effet de sa décharge dans un galvanomètre, après 1 ou 2 minutes d'électrisation, est comparé à celui obtenu, dans les mêmes conditions, avec 2 m de câble. On examine si le circuit est bien isolé en abandonnant le condensateur chargé, pendant 3 ou 4 minutes, avec sa clef de décharge dans la position d'isolement et la clef d'inversion de la pile relevée : il faut que l'élongation constatée après ce temps ne diffère pas sensiblement de celle due à la décharge immédiate.

L'essai peut également se faire par la méthode de perte de charge, mais l'isolement du condensateur utilisé doit alors être déterminé au préalable, par exemple en notant les durées

de décharge de l'appareil seul et dérivé sur une grande résistance connue.

Isolement des câbles industriels. — L'isolement prescrit pour les câbles industriels munis d'une gaine imperméable est généralement très élevé. L'isolement kilométrique minimum doit toujours atteindre plusieurs centaines de mégohms et l'on exige de plus une résistance supplémentaire, proportionnelle à la tension de service et d'au moins 25 mégohms par 100 volts, quand il s'agit d'applications utilisant des différences de potentiel considérables. Au premier abord, on ne conçoit pas bien la nécessité d'un isolement aussi grand, car la puissance perdue de ce chef pourrait devenir beaucoup plus forte sans cesser de représenter une très petite fraction de celle dissipée par effet Joule dans le conducteur. On a fréquemment exprimé l'opinion qu'un isolement kilométrique de 1 mégohm suffirait largement. Mais la difficulté est de maintenir un tel isolement, les substances qui le procurent ne résistant pas en général à l'électrolyse. On est donc obligé de recourir à des corps, tels que le caoutchouc, le papier, le jute, qui, même sous une faible épaisseur, possèdent un pouvoir isolant considérable.

L'isolement des câbles industriels se mesure par des méthodes analogues à celles employées pour les câbles recouverts de gutta-percha. De même que les câbles à diélectrique imperméable, ceux pourvus d'une gaine de plomb doivent être essayés sous l'eau, afin de vérifier leur étanchéité.

Souvent les câbles industriels destinés à des tensions alternatives élevées sont éprouvés, comme on l'a vu au chapitre précédent, sous des différences de potentiel variant du simple au double des voltages de service, pendant une durée qui ne doit pas être inférieure à 1 minute.

On étudiera plus loin les procédés propres à la vérification de l'isolement des réseaux électriques.

Capacité des canalisations. — La capacité des canalisations aériennes est minime. Elle est voisine de 0,01 microfarad par kilomètre pour un fil de cuivre de 3 mm de diamètre

suspendu à 5 m au-dessus du sol servant au retour du courant. Elle peut être évaluée par la méthode de comparaison, chap. XIII.

La capacité de certains câbles, particulièrement de ceux qui servent à la télégraphie, atteint près de 0,2 microfarad par kilomètre. La mesure peut se faire également par la méthode de comparaison dans le cas de câbles courts; mais, avec les longs câbles, il est nécessaire de recourir à une méthode de zéro telle que celle de Lord Kelvin, afin d'éliminer autant que possible l'influence de la différence entre les durées de charge du câble et du condensateur étalon. Des précautions du genre de celles que nous avons indiquées à propos des essais d'isolement doivent être prises. La charge du câble s'opère ordinairement pendant 1 minute, avec une pile d'une centaine d'éléments au sulfate de cuivre. Une correction est nécessaire pour tenir compte de la capacité des connexions. La température ne joue qu'un rôle très peu important avec la gutta-percha. L'isolement imparfait du câble entraîne aussi une erreur. Soient c et c' les capacités du câble et du condensateur étalon, r et r' les résistances de réglage correspondantes dans la méthode de Kelvin. En l'absence de pertes, on aurait $c/c' = r'/r$. Mais, avec un étalon sans fuite appréciable et un câble présentant une résistance d'isolement R_i, la condition d'équilibre devient

$$\frac{c}{c'} = \frac{r'}{\frac{r R_i}{r + R_i}}.$$

Avec les câbles industriels comportant 2 ou 3 conducteurs isolés et tordus sous une même armature de plomb, la capacité n'est pas calculable comme dans le cas d'un conducteur armé unique constituant un condensateur cylindrique simple. On mesure alors la capacité de chaque conducteur par rapport aux autres mis en communication avec l'armature et la capacité des conducteurs pris deux à deux, le troisième étant relié au plomb. Ces essais sont ordinairement effectués par la méthode de comparaison. On peut aussi utiliser un alternateur donnant une courbe de courant sinusoïdale: en notant les

valeurs efficaces V et I de la tension et du courant de charge, ainsi que la fréquence f, on a $c = I/2\pi fV$.

Une autre combinaison intéressante est fournie par les câbles industriels formés de deux conducteurs concentriques enveloppés par une armature. Si l'on cherche la capacité du conducteur intérieur par rapport à l'armature, on a affaire à deux condensateurs en cascade et le résultat est égal à l'inverse de la somme des inverses des capacités composantes. Si l'on met les deux conducteurs concentriques en relation avec une source électrique, l'armature étant à la terre, le condensateur externe ne se charge pas, de sorte que le conducteur extérieur prend le potentiel de l'armature. C'est pourquoi, dans les applications, ce conducteur est souvent connecté directement au sol. C'est également pour cette raison qu'il convient d'y raccorder les bobines ampèremétriques des appareils de mesure, en vue d'amoindrir le danger des manipulations.

Coefficients d'induction des canalisations. — La réactance des lignes tient à leur capacité et à leur inductance. Dans les câbles sous-marins et souterrains, le premier élément est de beaucoup le plus important, mais, dans les lignes aériennes, le second peut jouer un rôle sérieux, qui rend la détermination des coefficients d'induction nécessaire.

Le coefficient d'induction mutuelle de deux lignes peut s'estimer en fonction d'une capacité, en ayant recours à la méthode de zéro de MM. Vaschy et de la Touanne par exemple. Cet essai exige une correction pour tenir compte de la capacité relative des deux lignes. Afin d'estimer l'influence de l'induction électrostatique, il suffit d'isoler le fil inducteur à l'un des bouts. Dans le cas où la terre fait partie du circuit, il faut en outre éliminer les courants telluriques, qui peuvent être neutralisés par une pile shuntée, comme on l'a vu à propos de la résistance d'une canalisation posée.

Le coefficient de self-induction d'une ligne aérienne se détermine ordinairement par l'un des procédés de comparaison avec la capacité d'un condensateur. Ici encore la capacité de la ligne intervient. Voici comment on peut en tenir compte. On

sait qu'une capacité C dérivée sur une résistance R joue le rôle d'une self-induction — C R^2. Supposons que la ligne, de longueur l et reliée à la terre à une extrémité, présente, par unité de longueur, une self-induction $\mathcal{L}$, une résistance r et une capacité c. Si, à une distance x du bout en contact avec le sol, on considère un condensateur de capacité $c\,dx$ dérivé par rapport à la terre, la self-induction $\mathcal{L}l$ est diminuée d'une quantité $c\,dx \times r^2x^2$. Il s'ensuit que le coefficient de self-induction apparent de la ligne entière est

$$\mathcal{L}l - \int_0^l c\,r^2\,x^2\,dx = \mathcal{L}l - \frac{c\,r^2\,l^3}{3}.$$

C'est cette expression qu'il faut introduire dans les calculs de la mesure. Si l'on a affaire à une ligne complètement métallique, c représente la capacité linéaire relative des deux conducteurs constituants. La charge de la ligne change alors avec la répartition des potentiels le long des deux fils. Si les extrémités bouclées de ceux-ci sont réunies à la terre, l'un des conducteurs prend une quantité d'électricité positive et l'autre une quantité d'électricité négative égale, neutralisant la première lors de la décharge. On ramène le cas de deux fils à celui précédemment examiné en mettant à la terre, non leur boucle, mais l'extrémité libre de l'un d'eux : la charge est alors toute entière positive ou négative.

Le coefficient de self-induction des lignes aériennes vaut environ 2×10^{-3} henry par km avec des conducteurs en cuivre et 6×10^{-3} henry par km avec des conducteurs en fer.

Chapitre XXV.

ESSAIS DES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Essais périodiques. Méthode par courants reçus. — Les lignes télégraphiques, spécialement les lignes souterraines et sous-marines, doivent être l'objet d'essais périodiques, qui ont pour but, d'une part, de vérifier leur état et, d'autre part, de recueillir les données nécessaires pour localiser aisément, le cas échéant, la position des dérangements.

Ces essais consistent à déterminer la résistance électrique des conducteurs et la résistance d'isolement. Les résultats trouvés sont consignés dans des tableaux indiquant les dates des vérifications et les circonstances dans lesquelles celles-ci ont été faites. Pour les lignes aériennes, il convient, par exemple, de renseigner l'état atmosphérique (brouillard, pluie, neige, ciel serein), l'humidité de l'air ayant une grande influence sur l'isolement.

Voici un procédé simple de contrôle journalier des lignes télégraphiques d'un pays. Tous les postes dont les lignes convergent vers un bureau principal envoient vers celui-ci, à des moments déterminés et différant entr'eux de quelques minutes, un courant continu à l'aide de leur manipulateur et de leur pile de travail. Au poste central, ces courants sont reçus successivement dans un galvanomètre étalonné et leurs inten-

sités sont notées. Si un courant n'a pas son intensité normale, on procède, après la série des mesures, à des essais spéciaux, afin de voir si l'insuffisance est due à un défaut d'isolement de la ligne, à la fatigue de la pile du poste de transmission ou à d'autres causes. Pour contrôler l'état d'une pile, il suffit de relever la force électromotrice de ses éléments à l'aide d'un voltmètre approprié.

Ces expériences journalières sont excellentes pour surveiller la décroissance graduelle des courants et juger du moment où il convient de procéder à l'entretien des lignes et des piles.

Dérangements des lignes. — Les dérangements des lignes télégraphiques peuvent être classés dans les trois catégories suivantes :

1) Communication accidentelle d'une ligne avec la terre. Ce défaut se produit, par exemple, lorsqu'un fil se rompt et qu'un des bouts libres tombe sur le sol, quand un conducteur est touché par une branche d'arbre, lorsque l'enveloppe isolante d'un câble est perforée.

2) Communication entre deux lignes voisines. Un tel contact résulte soit du bris d'un fil dont les tronçons viennent toucher des fils voisins, soit du mélange de fils ballottés par le vent. La liaison peut aussi être établie par un objet intermédiaire.

3) Interruption d'une ligne. Ce dérangement n'est guère à considérer qu'avec les câbles souterrains ou sous-marins, dont le conducteur peut être rompu, tout en restant isolé par son enveloppe de gutta-percha. Dans le cas des lignes aériennes, un fil brisé tombe à terre ou sur un autre fil et le défaut rentre ordinairement dans l'une des catégories précédentes.

Lorsqu'un dérangement survient, on commence par le localiser entre deux postes; puis, s'il s'agit d'une ligne aérienne, on envoie le long de celle-ci un poseur, qui relève la faute et la répare. La visite peut se faire très rapidement quand la ligne longe un chemin de fer : l'agent, placé dans le fourgon d'un train, suit des yeux le fil qui lui a été indiqué.

Mais, quand on a affaire à un câble souterrain ou sous-marin, ou encore à une très longue ligne aérienne, il faut recourir à

des essais électriques pour déterminer l'endroit où existe le dérangement.

On fait une expérience préliminaire en vue de caractériser celui-ci. Dans ce but, on envoie le courant d'une pile sur la ligne à travers un galvanomètre. La résistance normale de la ligne étant connue par les mesures périodiques, si la déviation de l'instrument correspond à une intensité plus grande que celle déduite de la loi d'Ohm, il y a une perte ; si la déviation est très faible, il y a interruption ; enfin, si le courant est reçu par un fil voisin, il y a communication entre deux conducteurs.

Quand la nature du dérangement est précisée, on peut passer à la localisation de ce dernier. Les méthodes usitées à cet effet ont pour objectif, dans le cas du contact d'un fil avec la terre ou avec un autre conducteur, d'estimer la résistance x du tronçon de ligne défectueuse compris entre l'endroit où l'on opère et le contact. Si r désigne la résistance kilométrique, le rapport x/r représente, en kilomètres, la distance du défaut au poste d'observation. Dans la recherche de la position d'une faute sur un câble sous-marin, on aura soin de tenir compte du mou du câble.

Perte en un point d'une ligne. — Supposons qu'un câble sous-marin soit parfaitement isolé, sauf en un point où le diélectrique est percé. Soient x et y les résistances des deux tronçons du conducteur séparés par le défaut. La somme $x + y$ est connue par les mesures périodiques. Appelons z la résistance de la faute. En déterminant au poste A, fig. 239, la

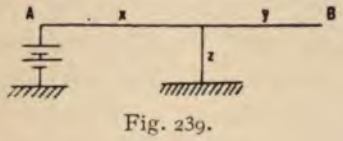


Fig. 239.

résistance de la ligne lorsqu'on met à la terre et qu'on isole successivement l'extrémité B, on obtient des valeurs dont la connaissance permet de calculer x, y et z. Toutefois, certaines circonstances rendent cet essai souvent très difficile.

En premier lieu, un câble n'est jamais parfaitement isolé. Si la résistance d'isolement est de l'ordre de celle du défaut, on peut la considérer comme due à une faute permanente située au milieu de la ligne. La perte localisée par l'essai ci-dessus est alors un défaut résultant fictif, ayant son point d'application entre le défaut réel et la faute correspondant à l'isolement imparfait. Connaissant la grandeur de cette dernière par les mesures périodiques, ainsi que l'importance du défaut résultant, on peut, en raisonnant comme pour la composition de forces parallèles, trouver la grandeur et le siège du défaut cherché.

La question se complique encore par le fait que la résistance de la perte à la terre est variable. Si, par exemple, le défaut est constitué par une fissure dans la gaine de gutta-percha, sa résistance comprend celle du liquide remplissant la fissure, devant laquelle la résistance du retour par la mer peut être négligée, et celle du contact de l'eau avec le conducteur, qui dépend de la nature des corps déposés sur ce dernier par l'électrolyse. Si l'on envoie, par l'un des bouts du câble isolé à l'autre extrémité, un courant qui rend le conducteur positif par rapport à l'eau de la mer, le cuivre se couvre d'une couche d'oxychlorure accroissant progressivement la résistance de la faute. Quand on envoie ensuite un courant de sens inverse, l'hydrogène et les alcalis provenant de la décomposition de l'eau salée réduisent le dépôt. Au moment où celui-ci est entièrement réduit, la résistance ne dépend plus que du liquide de la fissure et passe par un minimum. Mais celui-ci est de courte durée et l'hydrogène qui se dégage ensuite en bulles, ainsi que la soude qui environne le métal, rendent la résistance du défaut très changeante. C'est la valeur minima qu'il faut essayer de saisir. Dans ce but, M. Lumsden conseille d'appliquer au préalable, pendant 10 à 12 heures, un courant réducteur produit par une pile énergique, en vue de nettoyer le conducteur. On renverse de temps en temps le sens du courant pendant quelques minutes, pour détruire la soude formée. Ce traitement procure une surface métallique rugueuse favorable au dégagement de l'hydrogène. Le cuivre est ensuite

recouvert d'une pellicule d'oxychlorure par un courant oxydant, de 20 à 30 milli-ampères, maintenu pendant 1 minute environ. On mesure alors la résistance à l'aide d'un pont de Wheatstone à curseur et avec un courant réducteur. La valeur observée va en décroissant et on suit ses variations en réglant continuellement le pont. A un moment donné, elle s'élève brusquement, par suite du dégagement de l'hydrogène. On adopte le minimum constaté.

Une difficulté résulte de plus des courants telluriques et des effets de polarisation, dont il a déjà été question à propos de la mesure de la résistance des canalisations. A ces causes perturbatrices s'ajoute enfin, dans le cas d'un câble sous-marin, la force électromotrice de la pile constituée, à l'endroit du défaut, par le cuivre à nu, le fer de l'armature et l'eau de la mer. Ce couple, dont le cuivre est le pôle positif, détermine dans le conducteur un courant allant de la faute vers les extrémités reliées à la terre. On élimine les influences ci-dessus, soit en adoptant l'artifice du faux zéro, soit en neutralisant les tensions parasites au moyen d'une pile auxiliaire convenablement shuntée.

Méthode de Blavier. — Supposons qu'un câble présente

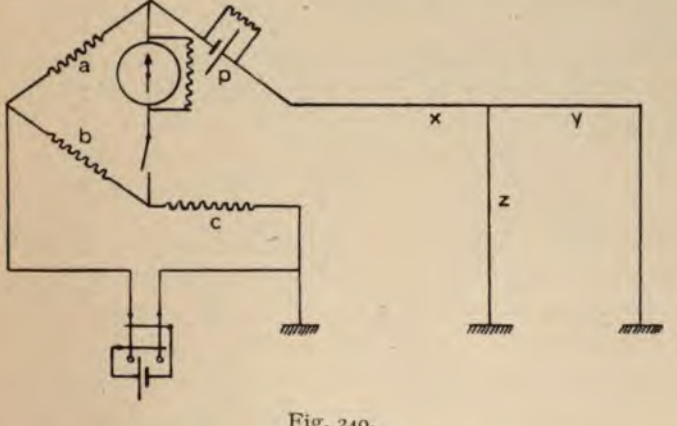


Fig. 240.

une perte unique et constitue la seule ligne disponible entre les postes extrêmes.

Établissons les connexions indiquées dans la fig. 240 et déterminons la résistance de la ligne d'abord isolée au bout non raccordée au pont, puis mise à la terre à cette extrémité, en observant les précautions mentionnées au paragraphe précédent. Une pile shuntée p sert à neutraliser les forces électromotrices parasites. Le galvanomètre n'est relié au circuit qu'après l'extinction du courant de charge. On utilise un appareil Deprez et d'Arsonval, afin de pouvoir procéder rapidement.

Soient r_1 la résistance du conducteur, r_2 et r_3 les valeurs fournies par les deux mesures. On a les relations

$$r_1 = x + y,$$
$$r_2 = x + z,$$
$$r_3 = x + \frac{yz}{y+z};$$

d'où l'on tire

$$x = r_3 - \sqrt{(r_1 - r_3)(r_2 - r_3)}.$$

Il faut que le courant ait sensiblement la même intensité à travers la faute dans les deux expériences, pour qu'on puisse admettre la constance de z.

Il est utile de répéter l'essai à l'autre bout de la ligne et de prendre la moyenne des résultats.

Méthode de Kennely. — En admettant, avec M. Kennely, que la résistance de la faute est représentée par la formule empirique

$$z = \frac{K}{\sqrt{i}},$$

lorsque le courant de perte i est inférieur à 25 milli-ampères et que le pôle négatif de la source électrique agissante est relié au conducteur, on peut mesurer $x + z$ au pont de Wheatstone avec différentes intensités de courant. Si r_1 est la valeur de cette somme correspondant à un courant donné à travers le défaut et r_2 celle trouvée avec un courant quadruple, les équations

$$r_1 = x + z \qquad \text{et} \qquad r_2 = x + \frac{z}{2}$$

conduisent à l'égalité

$$x = 2r_2 - r_1.$$

On emploiera, par exemple, des courants de 2, 3, 4 milli-ampères, puis des courants de 8, 12, 16 milli-ampères, et l'on prendra la moyenne des résultats obtenus. Cette façon de procéder élimine l'influence de la polarisation, qui crée une résistance apparente s'ajoutant au défaut.

Méthode de la boucle. — Lorsqu'il existe plusieurs lignes entre les postes extrêmes, on peut localiser le défaut, avec plus de sûreté que par les procédés ci-dessus, en faisant usage du dispositif suivant.

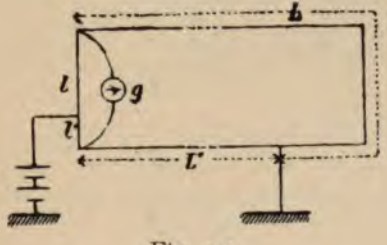


Fig. 241.

On boucle le conducteur fautif avec un conducteur intact à l'un des postes et on constitue, à l'autre poste, un pont de Wheatstone à l'aide d'une pile, d'un galvanomètre et des résistances l et l', fig. 241. La pile est pourvue d'une clef d'inversion et une clef de court-circuit empêche le courant de charge de détériorer le galvanomètre. On règle les résistances, en déplaçant le curseur qui les délimite, jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. On a alors

$$\frac{L}{L'} = \frac{l}{l'}.$$

La résistance du défaut, faisant partie de la diagonale de la pile, ne trouble pas l'équilibre par ses variations. On élimine l'influence des forces électromotrices parasites en prenant comme zéro de l'échelle la déviation constatée sans la pile.

Il faut répéter l'expérience après interversion du courant de la pile et adopter la moyenne des deux résultats trouvés. On détermine, d'autre part, la résistance L + L' par la méthode ordinaire du pont. Il est ainsi possible de calculer L et L'.

Si le tronçon correspondant à L' est court, on ajoute une résistance connue à sa suite, afin d'obtenir une exactitude plus grande dans la mesure. On peut aussi utiliser des branches de proportion égales et équilibrer le pont en ajustant cette résistance additionnelle.

Quand il y a plus d'un conducteur sain disponible, on recommence l'essai avec chacun d'eux, pour prendre des moyennes.

Méthode de la chute de potentiel. — Le conducteur défectueux BE est isolé à l'extrémité E et mis en série avec une résistance r à l'autre bout, fig. 242. On raccorde l'origine A

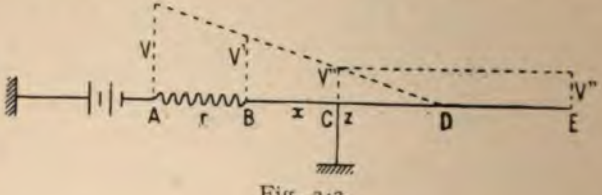


Fig. 242.

de cette résistance à la terre, par l'intermédiaire d'une pile dont le courant se ferme à travers la faute C, et l'on évalue, à l'aide d'un galvanomètre de grande résistance, les potentiels V, V' et V'' des points A, B et C. Le potentiel V'' se relève à l'extrémité E, soit directement, soit en utilisant un fil de retour accessible en A et bouclé au conducteur fautif en E.

On voit de suite, d'après le diagramme des potentiels, où la résistance de CD équivaut à z, que $r : x : z :: V - V' : V' - V'' : V''$.

Il est indispensable que la résistance du galvanomètre, servant de voltmètre, soit considérable par rapport à celle du défaut, sinon le raccordement de l'appareil perturberait la distribution des potentiels. Le courant doit être maintenu aussi constant que possible pendant l'essai. Il est utile, à ce point de vue, d'intervertir l'ordre du relevé des potentiels et de prendre des moyennes.

Correction pour l'isolement. — Les méthodes de localisation étudiées ci-dessus supposent la résistance de la faute négligeable devant la résistance d'isolement du câble. Dans le cas contraire, si celle-ci est très grande vis-à-vis de la résistance du conducteur, elle peut être représentée par un défaut permanent R_i situé au milieu de la ligne, fig. 243. R étant la faute réelle, le défaut apparent z vaut alors

$$z = \frac{R_i R}{R_i + R} \qquad (1)$$

et, en assimilant les fuites de courant, inversement proportionnelles aux résistances correspondantes, à des forces parallèles, on peut écrire

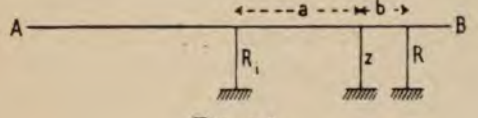


Fig. 243.

$$\frac{a}{b} = \frac{R_i}{R}. \qquad (2)$$

R_i est donné par les mesures périodiques ; la détermination expérimentale de z permet donc de tirer R de (1) et, comme la distance a est connue d'après l'essai de localisation, la longueur b résulte de (2).

Le problème est indéterminé s'il existe sur une ligne simultanément plusieurs défauts dont les positions, ainsi que les grandeurs, sont inconnues ; car une infinité de combinaisons peuvent alors conduire aux valeurs résultantes observées. C'est pourquoi il est si important de procéder à des essais périodiques, particulièrement sur les câbles sous-marins, dont les réparations entraînent parfois des frais énormes. Il est possible ainsi de localiser les fautes à mesure qu'elles se déclarent.

Communication entre deux lignes voisines. — Dans le cas d'un contact entre deux conducteurs, on isole, à l'un des postes, l'extrémité de l'un d'eux et on y met l'extrémité

du second à la terre; à l'autre poste, on complète un pont de Wheatstone par les connexions indiquées dans la fig. 244. Une mesure au pont permet de déterminer le rapport $x/(y+c)$, tandis que les essais périodiques font connaître $x+y$.

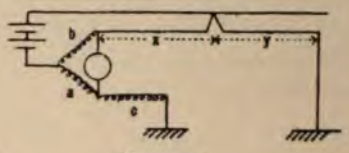


Fig. 244.

Cette méthode élimine complètement l'influence de la résistance variable du contact, qui est reporté dans une des diagonales et n'affecte en rien l'équilibre.

Si l'on dispose d'un conducteur en bon état entre les postes extrêmes, on peut aussi adopter la méthode de la boucle, en utilisant un des fils défectueux à la place du retour par la terre.

Interruption d'une ligne. — Lorsque le conducteur d'un câble est rompu et que les deux tronçons restent isolés dans la gaine de gutta-percha, on détermine successivement leurs capacités par l'une des méthodes de zéro recommandées pour les câbles. Les mesures périodiques faisant connaître la capacité kilométrique, on arrive ainsi à établir l'endroit de la rupture.

Souvent, en cas d'interruption d'une ligne sous-marine, la gaine isolante est également rompue et le cuivre est en contact avec l'eau de mer. On utilise alors avec avantage la méthode de Kennely, décrite plus haut, pour trouver la résistance du conducteur jusqu'au point défectueux.

Chapitre XXVI.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Isolement des réseaux. — Les réseaux électriques urbains distribuant des courants de bas voltage possèdent une résistance d'isolement assez faible. Le réseau à 3 fils de Berlin, qui est constitué par des câbles armés, comportait, en 1894, 700 kilomètres de conducteurs souterrains débitant un courant total de 80000 ampères sous la tension de 220 volts entre les distributeurs extrêmes; son isolement global n'était que de 14 ohms environ.

Les installations d'abonnés raccordées à un tel réseau présentent un développement impossible à déterminer exactement et sont médiocrement isolées. On ne peut donc pas baser l'estimation de la résistance d'isolement sur la longueur réelle des canalisations. Afin de tourner la difficulté, M. Picou a proposé de considérer l'étendue de celles-ci comme proportionnelle à l'intensité I du courant total fourni par le réseau. Si l'on admet, en outre, que l'isolement doit croître comme la différence de potentiel de service E, la résistance d'isolement de l'ensemble d'un réseau peut être exprimée par la formule

$$R = k \frac{E}{I}.$$

Le coefficient de proportionnalité k reste à déterminer. Dans le cas de Berlin, il vaut

$$k = \frac{I R}{E} = \frac{80000 \times 14}{220} = 5091.$$

On peut fixer ainsi l'isolement que doit offrir une portion quelconque du réseau, pourvu qu'on connaisse le courant correspondant.

Dans l'hypothèse d'une génératrice alimentant un réseau parfaitement isolé, la valeur absolue des potentiels aux divers points de celui-ci est indéterminée, attendu que les lois du courant ne considèrent que les différences de potentiel. Mais si un point du système est mis à la terre, il doit prendre le potentiel du sol; autrement, un courant permanent s'écoulerait de ce point vers le sol, ce qui est impossible puisque le circuit de la terre n'est pas fermé. Il s'ensuit que le potentiel est alors déterminé en tous les points du réseau.

S'il existe deux fautes, un courant permanent circule de l'une à l'autre par le sol, de sorte que l'un des points défectueux acquiert un potentiel positif et l'autre un potentiel négatif. Les valeurs de ces potentiels sont en raison des résistances des fautes. Il est donc possible de trouver les points du réseau au potentiel nul, qui se trouvent nécessairement entre les défauts en question.

La résistance d'isolement d'un réseau à 2 distributeurs est celle qu'on mesurerait entre l'ensemble de ceux-ci et la terre. Si les deux distributeurs ont séparément des résistances d'isolement R et R', le réseau possède la résistance combinée

$$\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}}.$$

Lorsqu'un réseau n'est pas en activité, le contrôle de son isolement peut s'opérer par un des procédés étudiés précédemment, notamment par la méthode de déviation. L'emploi de l'ohmmètre est commode dans les installations restreintes, dont la faible capacité ne peut pas fausser sérieusement les

résultats. La résistance trouvée comprend non seulement l'isolement des câbles, mais aussi celui de tous les appareils intercalés dans les circuits. Par suite de la complexité de ces appareils, il n'est pas intéressant, en général, d'évaluer séparément l'isolement de chacun des distributeurs du réseau. Il suffit de vérifier périodiquement l'isolement global, pour prévoir le moment où une chute notable en dessous de la valeur normale nécessitera une révision.

Mesure de l'isolement des réseaux à courant continu en service. Méthode du voltmètre. — On cherche autant que possible à ne pas devoir interrompre le fonctionnement des réseaux pour effectuer le contrôle de leur isolement.

Quand il s'agit d'une installation à courant continu, la résistance d'isolement se détermine aisément pendant le service à l'aide d'un voltmètre.

L'ensemble des dérivations vers la terre peut être assimilé à une faute unique ayant la résistance cherchée R. Soient V_1 et V_2 les potentiels des points de raccordement du réseau avec les dynamos génératrices. En reliant le voltmètre de résistance g, d'une part, au pôle de potentiel V_1 et, d'autre part, à la terre, l'appareil est traversé par un courant qui, si l'on désigne par v le potentiel du réseau à l'endroit du défaut, a pour intensité $(V_1 - v)/(g + R)$, de sorte que le nombre de volts marqué est

$$n_1 = \frac{V_1 - v}{g + R} g.$$

En raccordant ensuite le voltmètre au pôle de potentiel V_2 et à la terre, on obtient de même

$$n_2 = \frac{v - V_2}{g + R} g.$$

Enfin, avec l'instrument dérivé sur les deux pôles, on lit

$$n = V_1 - V_2.$$

De là, on tire

$$R = g\left(\frac{n}{n_1 + n_2} - 1\right).$$

Le raisonnement précédent n'implique aucune hypothèse quant à la disposition des récepteurs, qui peuvent donc être groupés en série, en dérivation ou suivant des combinaisons mixtes, mais il suppose la résistance mesurée négligeable devant celle du voltmètre, de façon que ce dernier ne modifie pas les potentiels lorsqu'il est branché entre les pôles et le sol.

Voici une démonstration convenant à un galvanomètre quelconque.

Soit un réseau alimenté par un générateur présentant aux bornes des potentiels $+V_1$ et $-V_2$, dont la différence est E. Abstraction faite de la résistance des conducteurs, les fuites sur les câbles positifs et négatifs peuvent être assimilées à des dérivations de résistances x et y ramenées aux pôles, fig. 245. Le courant de perte qui traverse ces deux résistances

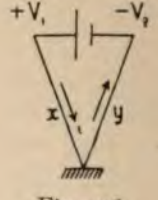


Fig. 245.

est le même, car on peut considérer la jonction à la terre comme un nœud et y appliquer la première loi de Kirchhoff. Appelons i ce courant. On a

$$i(x+y) = E$$

et

$$+V_1 = ix = \frac{E}{x+y}x = \frac{E}{y}\frac{xy}{x+y} = \frac{E\frac{1}{y}}{\frac{1}{R}},$$

en désignant par R la résistance combinée $xy/(x+y)$, qui mesure l'isolement du réseau. On trouverait de même

$$-V_2 = -\frac{E\frac{1}{x}}{\frac{1}{R}}.$$

Si l'on raccorde à la borne gauche un galvanomètre de résistance g, relié d'autre part à la terre, on met g en parallèle avec x et le potentiel de la borne en question devient

$$+ V'_1 = \frac{E\frac{1}{y}}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{g}\right)}.$$

Semblablement, en dérivant g sur y, il vient

$$- V'_2 = - \frac{E\frac{1}{x}}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{g}\right)}.$$

On tire des dernières équations

$$R = g\left(\frac{E}{V'_1 + V'_2} - 1\right),$$

$$x = g\,\frac{E - (V'_1 + V'_2)}{V'_2},$$

$$y = g\,\frac{E - (V'_1 + V'_2)}{V'_1}.$$

Quand le galvanomètre employé est gradué en voltmètre, ses indications donnent directement E, V'_1 et V'_2. Par suite, si n, n_1, n_2 sont les trois lectures relevées, assez vite pour éviter des changements de tension du générateur, successivement entre les pôles de celui-ci, entre sa borne gauche et la terre, entre sa borne droite et la terre, on peut écrire

$$R = g\left(\frac{n}{n_1 + n_2} - 1\right), \qquad (1)$$

$$x = g\,\frac{n - (n_1 + n_2)}{n_2},$$

$$y = g\,\frac{n - (n_1 + n_2)}{n_1}.$$

La formule (1) peut être étendue à un réseau à distributeurs

multiples. C'est ainsi que dans un réseau à 3 fils, dont le neutre a été momentanément détaché de la terre s'il y est normalement relié, on appréciera la résistance d'isolement R de l'ensemble en mesurant la tension n entre un des fils extrêmes et le fil neutre, ainsi que les différences de potentiel n_1 et n_2 entre ces deux fils et le sol. Lorsque le neutre est à la terre sur toute son étendue, on ne peut pas faire l'essai en charge et il faut recourir aux modes de signalisation des fautes indiqués plus loin.

Méthode de la dérivation. — On raccorde un galvanomètre de résistance g à la terre et à un point du réseau examiné, de manière à mesurer la tension E_1 existant entre ce point et le sol. On dispose ensuite, à côté du galvanomètre, une dérivation r, fig. 246; on observe ainsi une différence de poten-

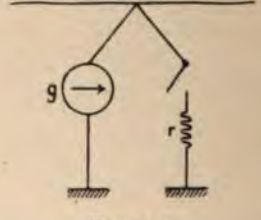


Fig. 246.

tiel E_2. La résistance d'isolement R cherchée est donnée par la formule

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r}\frac{E_2}{E_1 - E_2} - \frac{1}{g}.$$

Il est commode de varier r jusqu'à ce que $E_2 = E_1/2$; on a alors

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} - \frac{1}{g}.$$

Si, de plus, g est très grand, il vient $R = r$.

Cette méthode convient aussi aux réseaux à distributeurs multiples.

Mesure de l'isolement des réseaux à courants alternatifs en charge. — La méthode du voltmètre est applicable aux réseaux à courants alternatifs de basse tension avec un électrodynamomètre, dont la bobine fixe est parcourue par un courant dérivé emprunté à l'installation essayée et dont la bobine mobile est employée comme le voltmètre ci-dessus. Toutefois, les effets de capacité peuvent apporter des perturbations dans les expériences.

On préfère ordinairement superposer aux courants alternatifs de service un courant continu d'essai, fourni par une pile ou une magnéto, et utiliser un galvanomètre à aimant, tel qu'un voltmètre Weston ou Arnoux et Chauvin de grande résistance. On commence par déterminer le voltage du générateur continu. On intercale ensuite l'instrument de mesure dans un circuit formé par la source auxiliaire, une sûreté f, une self-induction $\mathcal{L}$ et un raccord avec un point du réseau, fig. 247. On

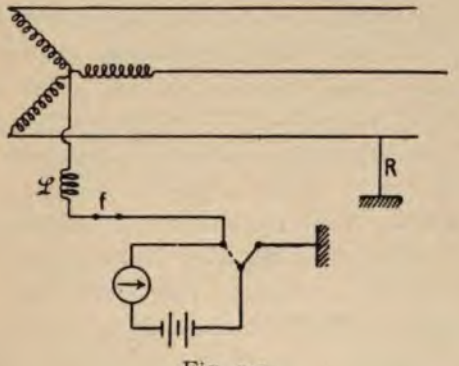


Fig. 247.

obtient ainsi deux déviations, qui permettent de calculer la faute résultante R, comme lorsqu'il s'agit de la recherche de la résistance d'isolement d'une installation inactive. Il faut avoir soin de s'assurer que la tension du générateur d'essai n'est pas modifiée dans la dernière expérience.

L'isolement des réseaux à courants alternatifs de haute tension doit être très élevé. On le surveille généralement au moyen d'indicateurs permanents, dont il sera question plus

loin. On peut cependant recourir à la méthode précédente, en faisant usage d'un galvanomètre sensible shunté et mis en série avec une résistance de l'ordre du mégohm, qui sert à déterminer la constante de l'appareil et reste en circuit lorsque ce dernier est relié au réseau étudié. Ce procédé est utilisé dans certains réseaux à 2000 volts.

Localisation des défauts d'isolement. Méthode de sectionnement. Variantes de la méthode de la boucle. Méthodes de la chute de potentiel et du voltmètre. Méthode de la boussole. Méthode de l'auteur. — Lorsqu'un arrêt du service de distribution de l'énergie électrique est possible, on peut appliquer à la recherche des dérangements quelques-unes des méthodes indiquées à propos des lignes télégraphiques.

Le défaut le plus fréquent est une dérivation à la terre.

Nous supposerons qu'aucune partie du réseau n'est raccordée intentionnellement au sol, ce qui est souvent le cas du fil neutre des distributions à conducteurs multiples. Si une liaison de l'espèce existe, une faute importante sur un des autres câbles occasionne immédiatement un courant excessif, qui fait fondre les sûretés protégeant la partie défectueuse. Quand une connexion du neutre avec la terre est réalisée normalement à l'usine, on la rompt au moment des essais.

Dans la méthode de sectionnement, on détermine le circuit où se trouve la perte en détachant successivement les divers tronçons et en vérifiant chaque fois l'isolement du système avec un instrument tel qu'un ohmmètre. Lorsque la section défectueuse est séparée, l'isolement redevient satisfaisant.

Il arrive qu'on ait à localiser une perte à la terre dans une canalisation formée de deux conducteurs bien définis, tels que deux feeders ou deux fils rattachant directement une station génératrice à un poste récepteur. Si l'on peut interrompre le service de ces conducteurs, la méthode de la boucle étudiée ci-dessus est applicable, à condition de prendre des précautions spéciales avec les gros câbles de faible résistance pour éviter les erreurs auxquelles exposent des contacts imparfaits. C'est ainsi que le galvanomètre doit être dérivé directement sur les

câbles, comme le montre la fig. 248, de manière que les raccords AC et BD de ceux-ci avec le fil divisé s'ajoutent à ce dernier, auquel on peut donner une résistance relativement grande. Ces raccords peuvent, au besoin, être estimés en divisions du fil AB. Le procédé convient aussi lorsqu'un essai de sectionnement a décelé une faute dans un câble entre deux trous d'homme, tels que C et D. A défaut de conducteurs de réserve entre ces points, on utilise des connexions temporaires déroulées sur le sol. Si les tronçons essayés sont constitués de bouts de sections inégales, les résistances comparées ne sont plus proportionnelles aux distances correspondantes, mais il est facile, connaissant les longueurs des divers types de câbles

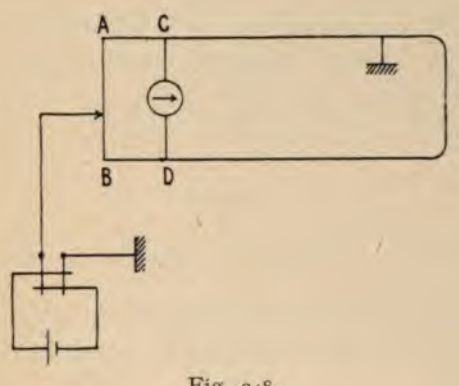


Fig. 248.

en jeu, d'apprécier les résistances individuelles de ceux-ci et de trouver ainsi la position du défaut cherché. Quand la ligne examinée est étendue, il est parfois nécessaire de faire la correction pour l'isolement indiquée au chapitre précédent.

Lorsqu'on ne dispose que d'un conducteur de retour trop résistant, tel qu'un fil pilote, on peut s'en servir pour tenter la méthode de la chute de potentiel, décrite plus haut.

Dans les distributions, on est ordinairement obligé de localiser les pertes à la terre pendant le service.

La méthode du voltmètre, p. 499, permet de déterminer l'endroit défectueux dans le cas d'un circuit simple, comme

celui de la fig. 249. Désignons par x et y les résistances des deux tronçons de canalisation séparés par la faute. L'un de ceux-ci peut comprendre un groupe de lampes en série ou en

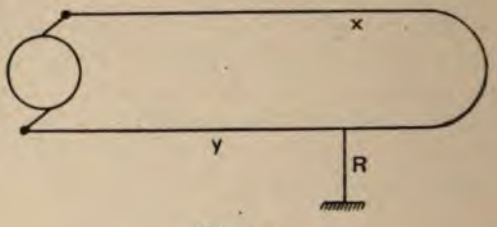


Fig. 249.

dérivation. Soit I le courant circulant dans le système. D'après la seconde loi de Kirchhoff, on a, en supposant les courants i et i' à travers le voltmètre négligeables devant I,

$$\mathrm{I}\,x - i\,(g + \mathrm{R}) = o,$$
$$\mathrm{I}\,y - i'\,(g + \mathrm{R}) = o;$$

d'où l'on tire

$$\frac{x}{x+y} = \frac{i}{i+i'}.$$

La méthode suivante, proposée par M. Frölich, est analogue à celle de la boucle, avec cette différence qu'elle utilise le géné-

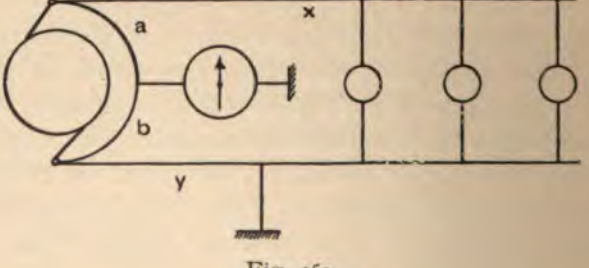


Fig. 250.

rateur de service au lieu d'une pile auxiliaire. Des rhéostats réglables a et b, ainsi qu'un galvanomètre, sont raccordés au

générateur comme le montre la fig. 250. Lorsque l'équilibre est établi,

$$\frac{x}{y} = \frac{a}{b}.$$

La résistance x, par exemple, peut comprendre les lampes alimentées. Ce dispositif est applicable à une distribution à 3 ou 5 conducteurs, pourvu que le neutre n'en soit pas à la terre.

Pour préciser l'endroit défectueux d'un réseau, un moyen fréquemment employé consiste à relever, à l'aide d'un voltmètre ou même d'une lampe à incandescence, les différences de potentiel entre le tronçon fautif et la terre, en touchant, dans les boîtes de jonction, d'une part le cuivre et d'autre part l'armature des câbles. A mesure qu'on approche du défaut, les tensions diminuent. On peut déterminer ainsi deux boîtes entre lesquelles existe la perte. La distance exacte de l'une des boîtes à la faute peut alors être trouvée par le procédé ci-après, dû à M. Hering, fig. 251. On raccorde une caisse

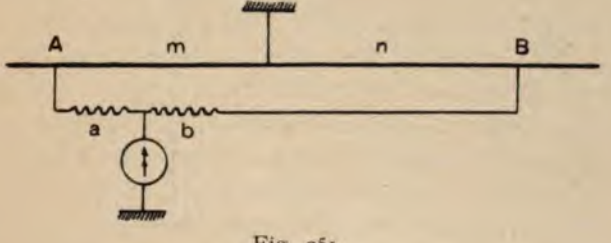


Fig. 251.

de résistances à la section endommagée A B, en se servant, pour la liaison avec l'extrémité éloignée B, d'un fil auxiliaire, tel qu'un fil pilote, et l'on constitue un pont de Wheatstone avec les deux bouts de câble m et n séparés par la faute, le circuit auxiliaire $a\ b$ et un galvanomètre connecté au sol. Lorsque le galvanomètre reste au zéro malgré le passage du courant de service, on a la relation

$$\frac{m}{n} = \frac{a}{b}.$$

Une boussole peut au besoin suffire pour localiser une terre dans un réseau à courant continu inactif ou dans une distribution à courants alternatifs en charge. Un générateur de courant continu est relié à la canalisation par un pôle et au sol par l'autre pôle. Son courant, qui se ferme à travers la faute et la terre, est observé au moyen d'une boussole approchée des conducteurs aux endroits accessibles, tels que les boîtes de jonction. Les diverses dérivations du courant d'essai convergeant toutes vers le point défectueux, quelques tâtonnements permettent de trouver le tronçon qui présente celui-ci.

L'auteur s'est bien trouvé du procédé de recherche suivant [1]. Soit à déterminer l'emplacement d'une perte à la terre sur un conducteur *a b*, fig. 252. On isole une des extrémités du fil et on

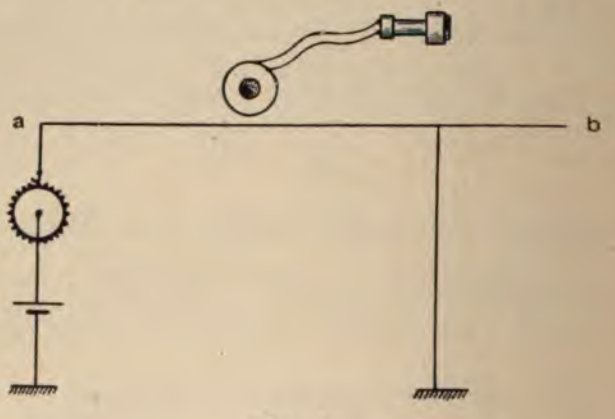


Fig. 252.

relie l'autre bout à une pile, par l'intermédiaire d'un interrupteur permettant d'envoyer des courants intermittents sur le tronçon limité au défaut. On suit la ligne à partir de l'interrupteur, en présentant transversalement au conducteur et le plus près possible de ce dernier une bobine droite à noyau divisé comme celui des petites bobines d'induction. L'enroulement est raccordé à un téléphone qu'on tient à l'oreille.

---

[1] *Bull. de l'Académie de Belgique*, 1885.

Les courants intermittents provoquent dans la bobine des courants induits accusés par le téléphone. Au moment où l'on dépasse la faute, le bruit cesse brusquement. Ce mode d'investigation s'applique aisément à une installation intérieure d'abonné, dont le branchement a été interrompu au préalable et dans laquelle il est facile de transporter la bobine le long des fils logés dans des moulures ou des tubes isolants, ou dissimulés dans des cloisons ou des planchers.

La méthode a été étendue aux canalisations souterraines. Si les câbles n'ont pas d'armature métallique, l'effet est très net. On peut, par exemple, opérer la recherche sur un feeder défectueux de réseau à courant continu en charge. Il suffit de mettre à l'usine génératrice un autre feeder à la terre par l'intermédiaire d'un interrupteur à marche continue et d'une résistance telle qu'une batterie de lampes à incandescence en parallèle. On provoque ainsi, sur la partie du conducteur fautif opposée à l'usine, des variations de courant susceptibles d'influencer le téléphone. Comme interrupteur il est possible d'utiliser une pièce de machine quelconque animée d'un mouvement périodique, notamment une manivelle. On peut aussi superposer au courant continu de service un courant d'essai variable, produit par un alternateur ou une bobine d'induction. La bobine exploratrice a reçu des formes variées. Parfois les spires sont enroulées sur un grand triangle équilatéral en bois, de 1 m de côté environ et dont la base est promenée parallèlement à la ligne examinée. On les a également disposées autour d'un noyau en fer laminé, articulé comme une pince pouvant se refermer sur les conducteurs aux endroits accessibles.

Lorsqu'il s'agit d'un câble armé, le courant auxiliaire passe à la terre, en partie, à l'endroit du défaut et, en partie, en suivant l'armature sur les deux tronçons délimités par la faute. Il s'ensuit que, dans l'un de ceux-ci, le courant inducteur capable d'agir sur le téléphone est égal au courant d'essai i dans le cuivre diminué du courant i' revenant par l'armature autour ce dernier et que, dans l'autre, le courant inducteur, qui traverse l'armature seule, n'est pas très différent de $i - i'$, si

le contact direct entre le cuivre et la terre est assez résistant. Dans ces conditions, l'altération du bruit téléphonique n'est pas nettement perçue au moment du passage par le point défectueux. On se contente alors d'approcher la bobine aux trous d'homme, où le câble est dépourvu d'armature, et de déterminer la section de canalisation endommagée.

La localisation d'une perte à la terre est d'autant plus aisée que la résistance du défaut est plus faible relativement à la résistance d'isolement de l'installation. Il arrive qu'une faute indiquée par les appareils signalisateurs n'est pas suffisante pour pouvoir être facilement localisée. Il peut y avoir intérêt à l'accentuer pendant un arrêt du service, pour éviter que son aggravation soudaine ne provoque une interruption à un moment de pleine charge du réseau, accident particulièrement à craindre avec les distributions à haute tension.

Il y a divers moyens de renforcer ainsi un défaut. On peut, par exemple, appliquer une surtension entre le conducteur défectueux et le sol, de manière à percer le diélectrique à l'endroit fautif. Quand il s'agit d'une distribution à 3 fils, dont un des ponts accuse un léger défaut, on relie souvent le pôle extrême de l'autre pont à la terre par l'intermédiaire d'une sûreté fusible, qu'on choisit d'abord très mince. Si celle-ci fond par l'effet du courant de perte, on la remplace successivement par des sûretés de diamètres croissants. Pour l'une d'elles, on n'observe plus la fusion, mais une des sûretés protégeant le branchement défectueux saute, en mettant par le fait la position de la faute en évidence. Il arrive aussi que le courant d'essai brûle le point endommagé, ce qui rend le procédé assez dangereux lorsque les raccordements d'abonnés sont compris dans le réseau examiné.

Il est à remarquer que, si l'on établit la communication avec le sol à travers une résistance décroissante, telle qu'une solution aqueuse de bicarbonate de soude dans laquelle on enfonce progressivement des électrodes, les deux pôles du générateur de service acquièrent la même différence de potentiel par rapport à la terre à l'instant où la résistance auxiliaire devient égale à celle de la faute, ce qui donne le moyen d'apprécier cette dernière.

Signalisation des pertes à la terre dans les réseaux en service. — Dans les réseaux peu étendus, on adopte souvent le dispositif suivant, propre à signaler immédiatement un défaut d'isolement, fig. 253. Soient deux conducteurs en rela-

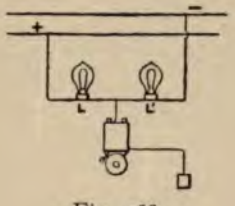


Fig. 253.

tion avec les pôles du générateur de service développant une différence de potentiel constante. Deux lampes à incandescence L et L', fabriquées chacune pour cette tension et disposées en série comme l'indique le croquis, ne fournissent qu'une lumière rougeâtre de faible intensité. Le fil de jonction de ces lampes est mis à la terre par l'intermédiaire d'une sonnerie trembleuse, sur laquelle est dérivée une résistance non inductive pour éviter de fortes étincelles d'extra-courant. Dès qu'un défaut d'isolement sérieux se déclare dans la canalisation, la sonnerie entre en activité grâce au courant de perte et celui-ci, en traversant l'une des lampes, lui donne un éclat supérieur à celui de l'autre lampe. Si la faute se produit sur un conducteur négatif par exemple, c'est la lampe L qui se met à briller plus vivement.

Souvent on se contente d'une seule lampe témoin, dont une des bornes est connectée au sol et qu'un commutateur permet de raccorder par l'autre borne successivement aux deux pôles générateurs. L'éclat de la lampe est différent pour les deux positions du commutateur, si l'installation présente une terre. Lorsqu'il s'agit de courants alternatifs à haute tension, on substitue à la lampe le primaire d'un transformateur réducteur, dont le secondaire est fermé sur une lampe ou sur un voltmètre, fig. 254.

M. Picou a imaginé une autre combinaison convenant aux courants alternatifs. Les conducteurs alimentant la distribution

sont réunis à deux condensateurs en cascade, formés chacun d'une paire de plaques, fig. 255. Les armatures intermédiaires communiquent avec un téléphone relié au sol. Le récepteur téléphonique vibre s'il existe un défaut d'isolement. Les indications sont continues et le bruit peut être rendu assez fort pour la perception à distance.

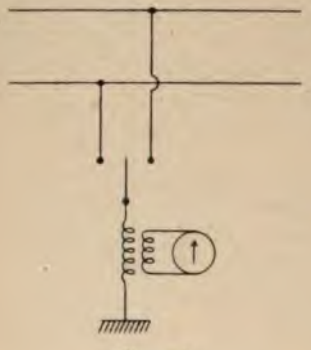


Fig. 254.

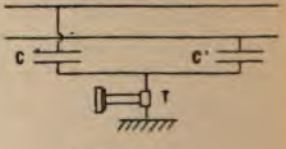


Fig. 255.

Dans un réseau à 3 distributeurs, un ampèremètre disposé entre le neutre et la terre accuse un courant quand l'état d'isolement des deux ponts n'est pas le même.

Des voltmètres électrostatiques dérivés, au tableau de distribution d'un réseau à haute tension, entre les barres collectrices et le sol signalent une perte sur un des pôles par la diminution de la déviation de l'appareil correspondant.

Dans les réseaux polyphasés à haut voltage, on intercale habituellement entre chaque phase et la terre un limiteur de tension formé d'un tube isolant à circulation d'eau. Pour la signalisation des fautes, il suffit de ménager des milli-ampèremètres entre les barres distributrices et les tubes. Le dispositif de la fig. 256 est construit par MM. Brown et Boveri. Le récipient servant de déversoir aux tubes verticaux communique avec le sol. Toute perte anormale sur une phase est accusée par un affaiblissement relatif de l'indication du milli-ampèremètre qui y correspond.

Dans la distribution à basse tension de Berlin, on a adopté des arrangements propres à déceler et à localiser approxima-

tivement une perte importante à la terre. Indépendamment du réseau général alimentant les récepteurs, on a constitué de

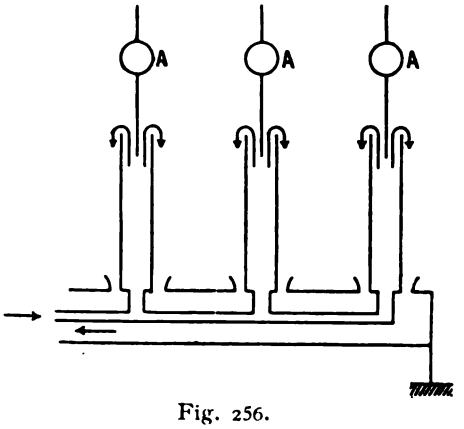


Fig. 256.

petits réseaux partiels au moyen de fils pilotes enfermés dans

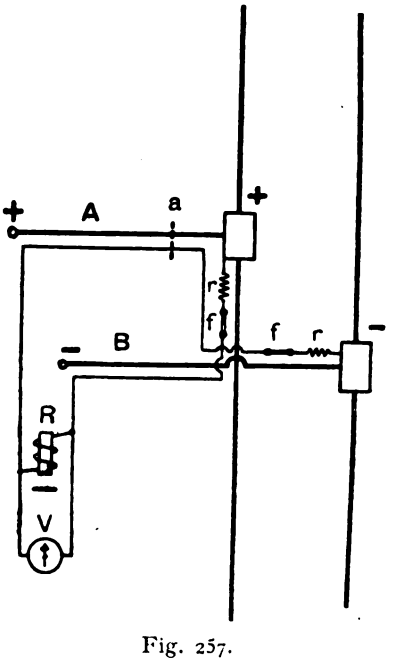


Fig. 257.

les câbles de distribution et séparés de ces derniers par une

légère couche isolante. Le fil pilote d'un câble positif A, fig. 257, est connecté, dans une des boîtes de jonction, au pôle négatif par l'intermédiaire d'une résistance *r* et d'une sûreté fusible *f*. Le fil pilote du câble négatif B correspondant est relié semblablement au pôle positif. A l'usine, ces fils pilotes sont raccordés à un voltmètre V, ainsi qu'à un relais R. Si un défaut d'isolement se déclare en *a* par exemple, un courant intense naît entre le câble distributeur positif et le fil pilote négatif joignant, ce qui détermine la fusion de la sûreté protégeant celui-ci. Les deux bornes du relais sont alors ramenées sensiblement au même

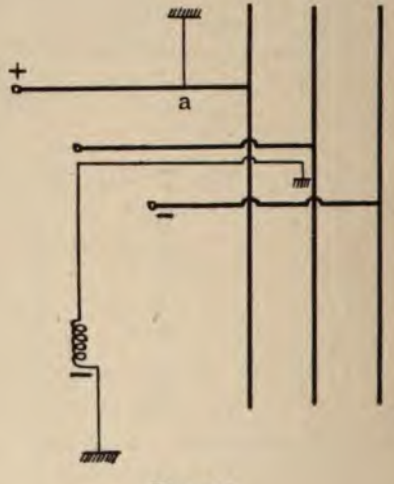


Fig. 258.

potentiel et l'armature, rendue libre, ferme le circuit d'une sonnerie d'avertissement, en faisant ainsi connaître la région de la canalisation où la faute s'est produite.

Quand la tension de service est supérieure à 220 volts, il est dangereux d'introduire dans les câbles distributeurs des fils indicateurs de polarité opposée. Il vaut mieux, dans ce cas, effectuer le raccordement dans la boîte de jonction considérée de manière à donner à chacun des fils pilotes la polarité du câble auquel il appartient, en interposant des résistances suffisantes pour empêcher l'attraction de l'armature du relais

tant qu'une d'elles n'est pas mise en court-circuit par le fait d'un défaut d'isolement amenant un contact direct entre le fil correspondant et son distributeur.

Le système suivant a été appliqué dans un réseau à 3 distributeurs. Les divers tronçons de câble neutre sont pourvus chacun d'un fil d'épreuve relié, d'une part, au sol par sa connexion avec l'armature protectrice et, d'autre part, à un relais dont la seconde borne est aussi mise à la terre, fig. 258. Si une faute se manifeste en *a* par exemple, l'armature et le sol prennent, dans son voisinage, un potentiel positif suffisant pour provoquer dans le fil auxiliaire un courant capable d'attirer la palette du relais et de mettre ainsi une sonnerie en branle. A l'aide d'un galvanomètre substitué au relais, on peut déterminer la différence de potentiel pour juger de l'importance du défaut.

Chapitre XXVII.

ESSAIS SPÉCIAUX AUX RÉSEAUX DE TRACTION.

Nous considèrerons le cas le plus fréquent d'un tramway à fil de trolley. Les indications données à ce sujet seront aisément étendues aux autres systèmes. Outre les mesures de résistance, les vérifications d'isolement et les recherches de défauts, qu'on doit effectuer sur les réseaux de traction aussi bien que dans ceux d'éclairage, il se présente pour les premiers quelques essais spéciaux. Sans parler des génératrices et des moteurs, qui seront visés dans des chapitres ultérieurs, il y a lieu de contrôler la résistance du retour par les rails, la conductance des joints de ceux-ci et le potentiel des rails par rapport au sol.

Résistance des lignes de contact. — Pour déterminer la résistance électrique d'une ligne de trolley, le procédé le plus simple est de se servir d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Pendant une interruption du service, on envoie sur la ligne à examiner une voiture, qui est arrêtée à l'endroit du raccord d'un feeder avec le fil de trolley. De l'usine on fait passer dans ce dernier un courant dont l'intensité, estimée par l'ampèremètre, est réglée à l'aide du rhéostat de la voiture. Au

moyen du voltmètre, on évalue la différence de potentiel entre l'origine du fil de trolley et les rails, puis entre ceux-ci et le point du fil de trolley où aboutit le feeder, point qu'on relie au voltmètre par l'intermédiaire de ce feeder employé en guise de conducteur de connexion. En divisant par le courant la chute de tension sur le fil de trolley, déduite de ces deux mesures, on obtient la résistance du fil. Avec les lignes qui possèdent des fils pilotes, on peut utiliser ces derniers pour les raccordements. Au besoin, on aura recours aux fils téléphoniques de service.

Résistance du retour. — La résistance du retour par les rails s'apprécie d'une manière semblable : en même temps que l'intensité du courant transmis, on relève la différence de potentiel entre les rails au voisinage de l'usine et les rails à l'extrémité de la ligne, en connectant à ces derniers un fil pilote par exemple. L'essai sera utilement répété en tous les points où aboutissent des fils pilotes ou des feeders, en vue de préciser les sections défectueuses.

On opère de même pour trouver la résistance d'un feeder de retour.

Résistance des joints de rails. — Pour estimer la résistance d'un joint de rails, on la compare ordinairement à celle d'un bout de rail de même longueur sans joint. Dans ce but, on fait arriver de l'usine, par l'intermédiaire du fil de trolley et d'une voiture, un courant qui retourne par la voie ferrée et l'on note, à l'aide d'un voltmètre, la différence de potentiel entre deux frotteurs à écartement constant placés successivement sur le tronçon jointé et sur un bout de rail plein attenant. Le voltmètre doit être suffisamment sensible pour permettre d'évaluer la chute de tension occasionnée par un courant d'une cinquantaine d'ampères dans une longueur de rail de 1 m, dont la résistance ne vaut que 0,000014 ohm pour une voie de 40 kg au mètre. Le courant d'essai peut aussi être emprunté à des couples secondaires portés par une voiture.

Lorsque les joints des deux files de rails ne sont pas alternés,

il est possible de vérifier rapidement leur conductance en faisant circuler sur la voie une voiture motrice et une voiture remorquée dont les trucs sont raccordés par un voltmètre à basse tension. Chaque passage de joints est accusé par une augmentation de la déviation de l'instrument. Une variation anormale décèle un joint défectueux.

On peut aussi recourir au galvanomètre différentiel ou au pont de Wheatstone pour comparer les résistances d'un joint et d'un bout de rail. Le dernier dispositif est le plus recommandable. On réalise le pont avec un fil divisé ou un rhéostat à curseur ab, le joint cd et un tronçon de rail de, fig. 259.

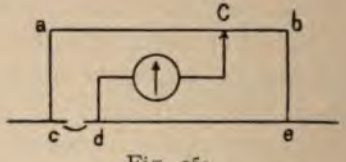


Fig. 259.

On fait varier la position du curseur C jusqu'à obtenir l'immobilité du galvanomètre relié à celui-ci. Le courant de service suffit pour la mesure.

Il est bon d'exécuter les expériences en question par temps sec, afin que les dérivations à travers la terre n'amènent pas d'erreur sensible.

Isolement. — L'isolement des fils de trolley et des feeders s'estime ordinairement par la méthode de déviation, chap. XXIV.

Un autre procédé consiste à faire usage d'un voltmètre de résistance g, au moyen duquel on évalue d'abord la tension V aux bornes des génératrices de service. En intercalant ensuite l'appareil entre le pôle isolé de celles-ci et la ligne à l'essai, on observe une chute de potentiel v, à laquelle correspond un courant de perte $i = v/g$. On obtient ainsi, pour la résistance d'isolement cherchée,

$$R = \frac{V - v}{i} = g\left(\frac{V - v}{v}\right).$$

Des moyens analogues peuvent servir à déterminer l'isolement des rails par rapport aux conduites souterraines voisines, en ayant égard à l'ordre de grandeur différent de la quantité à estimer, qui se rapproche ici de l'ohm, et en prenant des précautions pour éviter les perturbations dues aux courants telluriques et à la polarisation.

Dérangements. — Les défauts les plus fréquents sont la mise à la terre et l'interruption d'une ligne de trolley.

Les procédés de recherche décrits à propos des réseaux électriques en général trouvent leur application dans l'occurrence.

La méthode de sectionnement est notamment d'un emploi usuel. On détache successivement les divers tronçons de ligne jusqu'à ce que l'appareil de contrôle n'accuse plus de faute. La dernière section enlevée est celle qui présente le dérangement.

On peut localiser, pendant le service, un défaut d'isolement entre un fil de trolley et un fil transversal de suspension en faisant circuler lentement une voiture portant deux voltmètres, dont l'un marque la différence de potentiel entre le fil de trolley et le sol, tandis que l'autre renseigne la différence de potentiel entre celui-ci et les fils transversaux qu'on touche au passage avec une perche. Une forte déviation du dernier instrument est l'indice d'une perte à l'endroit correspondant.

L'usage du téléphone, indiqué par l'auteur, chap. XXVI, est susceptible de rendre des services. Ce mode d'investigation est utilisé couramment par la Société des tramways bruxellois, qui a installé à demeure, à son usine centrale, un mécanisme permettant d'envoyer des courants interrompus sur les lignes.

Différences de potentiel des rails entr'eux et par rapport aux conduites voisines. — Afin d'éviter la détérioration électrolytique des tuyaux métalliques proches des voies, les règlements prescrivent des différences de potentiel maxima entre les divers points des rails ou entre les rails et ces conduites.

Pour relever les premières tensions, on utilise des fils pilotes.

Un voltmètre sensible est raccordé aux rails, d'une part, à proximité de l'usine et, d'autre part, en différents endroits de la ligne. Les écarts de potentiel ainsi trouvés ne doivent pas dépasser une limite ordinairement fixée à 5 volts.

Pour vérifier les secondes tensions, il faut avoir soin d'employer un voltmètre très résistant, de peur que le courant absorbé par l'appareil ne change complètement la valeur cherchée, par suite de la résistance relativement grande de la terre intéressée dans le circuit de fuite. La méthode d'opposition étudiée au chap. IX échappe à cette cause d'erreur.

En vue de se rendre compte du courant qui revient à l'usine par une canalisation souterraine voisine, on relie celle-ci aux génératrices par un câble isolé dans lequel est intercalé un ampèremètre. Un autre ampèremètre est disposé entre les machines et les rails. La comparaison des indications de ces instruments, quand un courant de service est transmis par la ligne de contact à une voiture spéciale, permet de juger du rôle relatif des deux retours. Un voltmètre à grande résistance est utilement dérivé entre les rails et la conduite durant l'expérience, pour contrôler les différences de potentiel correspondant à divers courants de travail. C'est aussi à l'aide d'ampèremètres insérés dans les feeders de retour qu'on peut apprécier l'efficacité de ceux-ci et voir si leurs points de jonction avec les rails sont bien choisis.

Chapitre XXVIII.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Mesure de la force électromotrice. — Une pile est caractérisée, au point de vue électrique, par sa force électromotrice et sa résistance intérieure. C'est abusivement que ces quantités sont appelées *constantes* de la pile, attendu qu'elles ne peuvent avoir de signification précise que pour un débit déterminé et une durée donnée de passage du courant. Les phénomènes désignés sous le nom de polarisation ont pour effet de modifier la force électromotrice et la résistance intérieure des couples voltaïques dans des proportions encore mal définies. Il n'est, par suite, pas étonnant de voir que, si les mesures de force électromotrice à circuit ouvert donnent des résultats concordants, qui ont permis d'adopter certains éléments comme étalons de force électromotrice, les déterminations de force électromotrice à circuit fermé et de résistance intérieure conduisent à des valeurs variables avec les régimes auxquels les couples sont soumis pendant les essais. Alors qu'on est en droit d'exiger une grande approximation dans l'évaluation de la force électromotrice des piles à circuit ouvert, on ne peut atteindre qu'une concordance beaucoup moins satisfaisante dans les expériences à circuit fermé.

Nous avons décrit, à l'occasion de la mesure des potentiels, un certain nombre de méthodes applicables à l'estimation de la force électromotrice des générateurs hydro-électriques, entr'autres les procédés basés sur l'emploi de l'électromètre, du galvanomètre balistique et du voltmètre, ainsi que ceux de Poggendorff, de Clark et de Lacoine. Dans la plupart de ces méthodes il est possible de ne faire débiter à la pile étudiée qu'un courant extrêmement faible ou nul, de sorte que le résultat ainsi obtenu peut être considéré comme la valeur de la force électromotrice à circuit ouvert.

Mesure de l'effet utile. — L'essai le plus important à effectuer sur une pile est la détermination de l'énergie utile qu'elle est capable de fournir dans les conditions normales d'emploi, soit sous forme de courant continu ou de courant intermittent, en débitant sur une résistance invariable, en manganine par exemple, réglée de manière à obtenir l'intensité moyenne de régime. Cette expérience peut être conduite en notant, à des intervalles convenablement choisis, les tensions v indiquées par un voltmètre dérivé sur la résistance de charge r. La moyenne des rapports v^2/r multipliée par la durée de fonctionnement, qu'on prolonge jusqu'à ce que la différence de potentiel aux bornes soit tombée à une valeur jugée insuffisante, généralement 90 pour 100 de la valeur initiale pour les piles dites constantes, donne le résultat cherché. On simplifie l'essai par l'emploi d'un voltmètre enregistreur.

Quand un nouveau type de pile est soumis au contrôle, on prend ordinairement un certain nombre d'éléments, qu'on raccorde séparément à des résistances constituées chacune par une bobine de fil de manganine. Ces résistances peuvent être différentes, en vue d'examiner les couples avec des courants variés. On relève périodiquement la tension aux bornes des divers éléments et l'on dresse les courbes du voltage en fonction du temps. On peut appliquer simultanément la méthode du voltmètre exposée plus loin, pour étudier les variations de la force électromotrice et de la résistance intérieure.

Reste à estimer les matières consommées et à évaluer le

coût de production du kilowatt-heure. Souvent, on se contente de déterminer la perte de poids du zinc et de la comparer à la dépense théorique, qui est de 1,22 gramme environ par ampère-heure.

Mesure de la résistance intérieure. Méthode de la déviation réduite. — La quantité à mesurer dépendant de l'intensité du courant débité, il faut chercher dans les essais à donner à celui-ci des valeurs qui ne s'écartent pas trop de celles que la pile est appelée à fournir dans les applications auxquelles on la destine.

La méthode de la déviation réduite pour la mesure de la résistance intérieure d'une pile est analogue à la méthode de ce nom convenant à l'évaluation de la résistance d'un galvanomètre.

Pour l'appliquer on constitue un circuit avec la pile à essayer, un galvanomètre shunté, une boîte de résistances et une clef. Si ρ désigne la résistance cherchée, g la résistance combinée du galvanomètre et de son shunt de pouvoir multiplicateur m et r la résistance débouchée dans la boîte, on obtient une déviation α telle que

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r)\, m}.$$

Une plus grande résistance r' prise dans la boîte donne un courant

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r')\, m},$$

en supposant que la force électromotrice de la pile soit restée la même, hypothèse qui ne peut être admise que si les intensités i et i' ne sont pas trop différentes et si la clef n'est maintenue fermée que pendant le temps strictement nécessaire pour les lectures. Des équations précédentes on tire

$$\rho = \frac{\alpha' (g + r') - \alpha (g + r)}{\alpha - \alpha'}.$$

La discussion de la méthode montre que, pour accroître

l'exactitude du résultat, il faut réduire $g + r$ autant que possible et choisir r' de telle façon que α' soit égal à la moitié environ de α, qui doit s'approcher de l'extrémité de l'échelle. Les considérations exposées plus haut ne permettent pas toutefois de diminuer $g + r$ en dessous d'une certaine limite, atteignant au moins la résistance de la pile avec les éléments du genre Daniell et très supérieure à cette valeur avec les éléments fort polarisables, comme les couples Leclanché.

Lorsqu'on utilise un galvanomètre sensible, on est amené à le pourvoir d'un shunt qui rend g négligeable devant r et r'.

Méthode d'égale déviation. — Cette méthode ressemble aussi à celle de même nom applicable aux galvanomètres.

Dans une boîte mise en série avec la pile étudiée et un galvanomètre muni éventuellement d'un shunt de pouvoir multiplicateur m, auquel correspond une résistance combinée g, on débouche une résistance r occasionnant une déviation α telle que

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + g + r}\,\frac{1}{m}.$$

On shunte ensuite la pile par une résistance s et l'on substitue à r une résistance r', de manière à reproduire la déviation α. On a, dans ce cas,

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + \dfrac{s(g + r')}{s + g + r'}}\,\frac{s}{s + g + r'}\,\frac{1}{m}.$$

On déduit de là

$$\rho = \frac{s(r - r')}{g + r'}.$$

La réserve faite, en discutant la méthode précédente, quant à la réduction limite de la résistance du circuit extérieur de la pile doit également être prise en considération ici pour l'interprétation de la formule

$$\frac{d\rho}{\rho} = \left(1 + \frac{s}{\rho}\right)\left(1 + \frac{\rho}{g + r}\right)\frac{d\alpha}{\alpha},$$

à laquelle on arrive en raisonnant comme dans la recherche des meilleures conditions d'expérience du procédé d'égale déviation pour la mesure de la résistance d'un galvanomètre.

Méthode de M. Mance. — Elle est l'équivalent de la méthode indiquée par Lord Kelvin pour les galvanomètres.

La pile à essayer est insérée dans la branche inconnue d'un pont de Wheatstone, dont les résistances a, b et c sont réglées jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre soit la même dans les deux positions de la clef k_1, fig. 260. On a alors

$$\rho = \frac{b\,c}{a}.$$

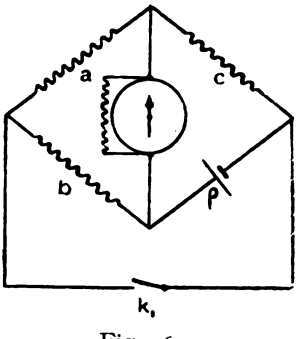


Fig. 260.

Les conditions de sensibilité maxima sont analogues à celles de la méthode rappelée de Lord Kelvin. Pour permettre d'accroître la déviation autant que possible, le zéro de la graduation peut être pris à l'une des extrémités de l'échelle galvanométrique. Il est important de placer le galvanomètre dans la diagonale joignant le point de concours des côtés les moins résistants à celui des côtés les plus résistants.

On remarquera que les deux positions de la clef k_1 correspondent à des débits très différents de la pile. Aussi ne doit-on pas s'attendre à des résultats très exacts avec les couples polarisables. On commencera par choisir une résistance de comparaison c trop grande et on la diminuera progressivement jusqu'à réduire au minimum la variation que la déviation subit

au moment de la fermeture de la clef k_1. Si l'on maintenait celle-ci abaissée, on constaterait un affaiblissement graduel de la déviation, amené par le surcroît de courant fourni au circuit peu résistant $\rho\, b\, k_1$.

On peut renforcer la résistance à mesurer sans majorer la force électromotrice en employant $2n + 1$ éléments, dont n en opposition par rapport à $n + 1$.

Méthodes de M. Kohlrausch et de MM. Ferrié et Carpentier. — La méthode proposée par M. Kohlrausch pour estimer la résistance des électrolytes convient aussi à la détermination de la résistance des piles.

L'emploi d'un récepteur téléphonique permet un essai rapide. On place un condensateur en série avec le téléphone pour éviter dans celui-ci le courant continu de la pile examinée. Un autre condensateur peut être disposé à la suite de l'enroulement secondaire de la bobine d'induction, si le courant de la pile est à redouter pour le fil induit. Quand on craint un débit trop fort pour une pile polarisable ou lorsqu'il s'agit d'accumulateurs pouvant détériorer les résistances du pont, on met deux éléments en opposition, de manière à supprimer le courant continu et à ne laisser passer que le courant alternatif de mesure.

On sait quelles difficultés la self-induction des branches du pont et la capacité de polarisation des électrodes apportent dans l'exécution d'une telle expérience, mais ces objections n'ont pas ici la même importance que dans le cas des électrolytes, attendu qu'on ne cherche pas à atteindre une grande exactitude. Le procédé dont il s'agit offre la particularité de donner pour la résistance des piles des valeurs indépendantes de leur force électromotrice et qui ne sont partant pas entachées des erreurs dues, dans les autres méthodes, aux variations de celle-ci.

Le dispositif de MM. Ferrié et Carpentier renseigné au chap. XXI procure plus de précision que le téléphone.

Méthode de M. Uppenborn. — M. Uppenborn a imaginé une variante de la méthode de M. Kohlrausch, permettant de

mesurer la résistance intérieure des piles primaires ou secondaires sous divers régimes de débit. Quatre éléments identiques, disposés en opposition par rapport au pont, sont groupés par deux en série et deux en dérivation sur un rhéostat réglable r, mis à la suite d'un ampèremètre, fig. 261. En modi-

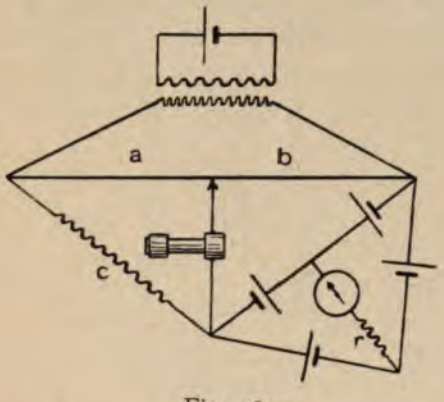


Fig. 261.

fiant r, on fait produire aux couples des courants variés. On détermine chaque fois la résistance combinée de l'ensemble des quatre couples, qui est égale à la résistance d'un seul élément. L'ampèremètre et le rhéostat r ne sont pas traversés par le courant alternatif.

Méthode du voltmètre. — Le procédé suivant est souvent adopté à cause de sa simplicité.

Après avoir mesuré la force électromotrice e à circuit ouvert, on détermine la différence de potentiel v aux bornes de la pile mise en circuit sur une résistance connue r, fig. 262. Si la force électromotrice est restée la même, on peut écrire

$$v = e \frac{r}{r + \rho}$$

ou

$$\rho = r \frac{(e - v)}{v} = r \frac{(\alpha - \alpha')}{\alpha'},$$

en désignant par α et α' les deux déviations successives du galvanomètre proportionnel utilisé comme voltmètre.

Pour que la force électromotrice ne change pas, il faut que l'appareil donne des indications rapides et que la résistance r ne soit pas trop faible. Si l'on discute la méthode sans se soucier de la polarisation, on trouve que l'inexactitude des lectures a la moindre influence sur le résultat lorsque r est voisin de ρ; mais, avec les couples très polarisables, on obtiendrait ainsi des valeurs beaucoup trop fortes pour la résistance intérieure.

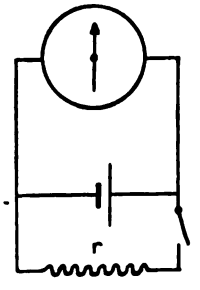


Fig. 262.

Quand on ne connaît pas la résistance r, on peut évaluer le courant i qui la traverse à l'aide d'un ampèremètre. On a alors

$$i = \frac{e}{r+\rho} = \frac{v}{r} = \frac{e-v}{\rho},$$

soit

$$\rho = \frac{e-v}{i}.$$

Méthode de M. Munro. — La méthode de M. Munro, susceptible de nombreuses variantes, est particulièrement applicable aux piles polarisables.

Un condensateur de capacité c est disposé à la suite d'un galvanomètre balistique g, fig. 263. En abaissant la clef k_1 pour raccorder l'ensemble à la pile étudiée, de force électromotrice e et de résistance ρ, on charge le condensateur d'une quantité d'électricité

$$q = ce,$$

à laquelle correspond une élongation α du galvanomètre. Par la fermeture de la clef k_2, qui relie la pile à une résistance r abaissant la tension à ses bornes à une valeur v, on décharge ensuite partiellement le condensateur, dont la charge devient ainsi

$$q' = cv = ce\frac{r}{r+\rho},$$

tandis que le galvanomètre, traversé par la quantité d'électricité $q - q'$ déchargée, accuse une élongation α' de sens contraire.

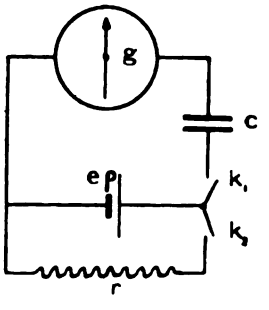


Fig. 263.

Des équations précédentes on tire

$$\frac{q'}{q} = \frac{r}{r+\rho} \quad \text{ou} \quad \frac{q-q'}{q} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\rho}{r+\rho},$$

c'est-à-dire

$$\rho = r\frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On a admis ci-dessus que la force électromotrice de la pile n'est pas altérée au moment de l'abaissement de la clef k_2. Il faut un galvanomètre à courte période pour que la polarisation ne fausse pas le résultat.

Chapitre XXIX.

ACCUMULATEURS.

Essais divers. Méthodes de MM. Boccali et Nernst pour mesurer la résistance intérieure des couples secondaires. — Outre les déterminations de force électromotrice et de résistance intérieure, qui peuvent s'effectuer par les méthodes étudiées précédemment, en ayant égard aux intensités élevées qu'admettent les piles secondaires, celles-ci donnent lieu à des essais de capacité voltaïque, d'énergie débitée, de rendement en quantité et de rendement en énergie, sous divers régimes de courant. En vue de rendre les valeurs comparables, on rapporte ordinairement l'intensité de courant, la capacité, la puissance et l'énergie au kilogramme d'électrodes ou de poids total d'un élément.

Pour estimer les diverses quantités cherchées, on relève, pendant la charge comme pendant la décharge et à des intervalles de temps suffisamment rapprochés, la différence de potentiel aux bornes et l'intensité du courant. Dans le cas d'une décharge lente, on admet ordinairement que l'opération est terminée quand la tension aux bornes est tombée à 90 pour 100 de sa valeur initiale. Les lectures doivent être plus fréquentes au commencement et à la fin de la charge et de la décharge,

parce que les variations du voltage et du courant sont plus rapides à ces moments. On dresse des courbes dont les abscisses représentent le temps et les ordonnées les valeurs de la différence de potentiel, du courant et de la puissance correspondant aux différentes observations. Ces courbes permettent de déterminer, à l'aide du planimètre par exemple, la quantité d'électricité absorbée et celle rendue, ainsi que l'énergie dépensée et celle recueillie. On déduit de là les rendements en quantité et en énergie. On doit se garder de considérer comme puissance moyenne le produit de la différence de potentiel moyenne par l'intensité moyenne du courant : il faut prendre la moyenne des produits des valeurs simultanées de la tension et du courant.

On facilite les expériences en se servant d'appareils enregistreurs. Un ampèremètre enregistreur fait connaître la capacité et le rendement en quantité. Il est à remarquer qu'un coulombmètre Aron peut également fournir ces éléments : la quantité d'électricité emmagasinée et la quantité restituée se traduisent par des indications de sens inverse au totalisateur, qui renseigne, à la fin de la décharge, la différence entre les coulombs reçus et les coulombs débités. Un ampèremètre et un voltmètre enregistreurs procurent les données nécessaires pour calculer l'énergie utile et le rendement en énergie. Un wattmètre enregistreur ou un compteur joulemètre conduisent plus directement encore à ces derniers résultats.

Pour exécuter un grand nombre d'essais, il est commode d'effectuer la charge à travers un rhéostat raccordé à une distribution sous tension constante, un ampèremètre servant à contrôler le régime du courant, un coulombmètre ou un ampèremètre enregistreur indiquant la quantité d'électricité emmagasinée, un wattmètre enregistreur ou un joulemètre renseignant l'énergie dépensée et un voltmètre accusant la tension limite de charge. Les mêmes instruments sont utilisés pour la décharge, le rhéostat absorbant l'énergie rendue.

On ne perdra pas de vue que les rendements d'un accumulateur dépendent en grande partie des états de service antérieurs de l'élément. Si, par exemple, après avoir surchargé un

couple secondaire, on le décharge jusqu'à ce que la différence de potentiel atteigne la limite inférieure normale, on peut trouver qu'une charge et une décharge normales subséquentes donnent un rendement en quantité supérieur à 100 pour 100, la seconde décharge restituant une partie de la première charge. Pour obtenir des résultats comparables, il est nécessaire de commencer par faire subir à l'accumulateur une série ininterrompue de charges et de décharges poussées jusqu'aux mêmes tensions extrêmes. Lorsque l'élément a été trop chargé antérieurement, on constate que les rendements vont en décroissant vers une valeur constante. Quand il a été trop déchargé ou lorsqu'il a été abandonné pendant quelque temps à lui-même, on observe, au contraire, des rendements croissant vers cette même valeur constante, qui constitue le chiffre à adopter. Si, faute de temps, on doit se contenter d'expériences écourtées, il faut avoir soin de le signaler, afin d'éviter une fausse interprétation des résultats. C'est ainsi que la mention de l'énergie récupérée après une charge à fond ne permet pas de juger de l'effet utile.

Les mesures électriques sont toujours complétées par des observations densimétriques, destinées à montrer les variations du poids spécifique de l'électrolyte pendant la charge et la décharge. On note aussi les changements de température du liquide et de l'air ambiant.

Souvent on exige que les essais effectués sur des accumulateurs reproduisent les conditions d'emploi de ceux-ci. C'est pourquoi les couples secondaires destinés à la traction sont ordinairement soumis pendant les expériences à des régimes variables de décharge et à des trépidations, en vue de voir l'influence de ces circonstances sur le fonctionnement et la durée des éléments.

Comme l'extrapolation est toujours dangereuse dans les phénomènes physiques, on ne peut être fixé sérieusement sur la durée d'un type d'accumulateur que par un essai de durée. Un examen ne portant que sur quelques charges et décharges n'a aucune signification à cet égard.

Il est utile de se rendre compte du rôle de chacune des

électrodes pendant la décharge d'un couple secondaire. Dans ce but, on fait usage d'une électrode auxiliaire en zinc amalgamé ou en cadmium, qu'on immerge dans le liquide et qui est reliée à l'une des bornes d'un voltmètre, dont l'autre borne est mise en communication alternativement avec les deux pôles de l'élément. La différence algébrique des deux voltages ainsi relevés est égale à la tension de l'accumulateur. Si l'on trace les diagrammes figurant ces voltages en fonction du temps, on voit que la différence de potentiel entre l'électrode auxiliaire et les plaques positives tombe brusquement quand la décharge de celles-ci approche de sa fin, tandis que la différence de potentiel entre l'électrode auxiliaire et les plaques négatives monte rapidement quand ces dernières s'épuisent. Dans les accumulateurs usuels au plomb normalement chargés, la différence de potentiel entre l'électrode auxiliaire et les plaques peroxydées est de 2,4 volts avec le zinc et de 2,17 volts avec le cadmium ; par rapport aux plaques couvertes de plomb spongieux, on trouve respectivement 0,4 et 0,16 volt. On peut aussi suspendre dans le bain, en dehors des lignes de courant, deux petites électrodes ordinaires, une positive et une négative, qui restent invariables et observer, à l'aide d'un voltmètre, la différence de potentiel entre chacune d'elles et les plaques de même nom en service, ce qui permet de contrôler la diminution progressive des charges des électrodes qui fonctionnent.

La mesure de la résistance intérieure des piles secondaires est importante, surtout quand il s'agit de batteries-tampons où cet élément joue un rôle essentiel dans le réglage des tensions de distribution. Vu la petitesse de la résistance en question, on aura avantageusement recours à la méthode de M. Kohlrausch, en adoptant un pont à téléphone dont le fil divisé en manganine a 1 m de longueur et 1 à 2 mm de diamètre, et en utilisant une résistance de comparaison de 0,01 à 0,1 d'ohm.

M. Boccali a modifié le dispositif de M. Kohlrausch en vue d'évaluer la résistance intérieure pendant la charge et la décharge. Pour opérer pendant la charge, la pile e à essayer et une dynamo D sont mises en série avec une résistance r formée de barres en parallèle, fig. 264. Un fil calibré AB est placé en

dérivation. Les variations de courant produites par le passage des balais de la génératrice sur les lames du collecteur suffisent pour faire vibrer le diaphragme téléphonique, tant que l'équilibre n'est pas réglé. Afin d'éliminer les erreurs auxquelles exposent les fils de connexion, dont les résistances ne sont nullement négligeables, on fait, suivant l'artifice indiqué par MM. Matthiesen et Hockin, quatre expériences en raccordant le téléphone successivement aux quatre contacts figurés. Pour opérer pendant la décharge, on remplace la dynamo par un interrupteur à manivelle déterminant dans le courant débité par la pile des variations suffisantes pour influencer le récepteur téléphonique.

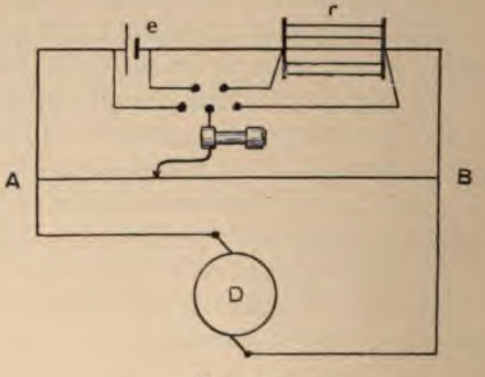


Fig. 264.

Remarquons incidemment que le procédé ci-dessus convient aussi à l'estimation de la résistance d'une lampe à arc en fonctionnement. Comme la différence de potentiel entre les points A et B est alors élevée, on substitue au fil divisé une résistance liquide.

M. Nernst a adopté une combinaison rappelant les ponts à condensateurs, fig. 265. Le couple secondaire étudié E, débitant sur sa résistance de décharge et un ampèremètre, est disposé en circuit avec un fil divisé *ab* ainsi que deux condensateurs C_1 et C_2, de 1 à 10 microfarads, qui s'opposent au passage d'un courant continu. Un téléphone de faible résistance est relié à la jonction de ces condensateurs et au curseur

du fil calibré. Le circuit de l'enroulement secondaire à gros fil d'une bobine d'induction est également coupé par un condensateur C. On commence par étalonner l'appareil au moyen de résistances connues substituées à l'ensemble de l'accumulateur et de son circuit de décharge. On peut alors déterminer la résistance combinée R de ces derniers. Si ρ est la résistance cherchée de l'élément et r celle du circuit de décharge supposé sans réactance, on a

$$\rho = \frac{R\,r}{r - R}.$$

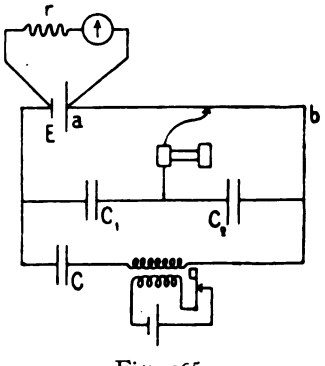


Fig. 265.

Il est souvent utile de donner une idée de l'isolement d'une batterie secondaire. Après avoir isolé les pôles de celle-ci, dont E désigne la force électromotrice, relions-les successivement à un ampèremètre communiquant d'autre part avec la terre. Soient I et I′ les courants observés. On peut définir sous le nom de résistance à l'isolement de la pile le rapport E/(I+I′).

Chapitre XXX.

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Avant d'aborder l'étude détaillée des méthodes d'essai des générateurs, moteurs et transformateurs électromagnétiques, nous donnerons quelques indications générales sur les définitions admises et les conventions établies au sujet du rendement, de l'échauffement, de l'isolement, de la rigidité diélectrique et du régime de ces appareils. Divers règlements, dont on trouvera un résumé à la fin de ce volume, ont codifié les prescriptions usitées à cet égard.

Rendement. — Le rendement d'un appareil électromagnétique est le rapport de la puissance utilisable à la puissance reçue.

Avec les appareils à courants alternatifs, sauf convention contraire, la puissance électrique est considérée dans l'hypothèse où le courant est en phase avec la différence de potentiel, à moins qu'il n'existe un déphasage inhérent, comme c'est le cas pour les moteurs asynchrones et les primaires des transformateurs.

Dans l'évaluation de la puissance mécanique des machines, on exclut les pertes dues aux engrenages, courroies ou autres intermédiaires, pour ne tenir compte que des déchets mécani-

ques dus aux frottements propres des machines et à la ventilation occasionnée par le déplacement des parties mobiles de celles-ci. Il est cependant des cas, tels que celui des moteurs de tramway, où les engrenages sont inclus dans le rendement.

Les pertes par frottements et par ventilation sont habituellement regardées comme indépendantes de la charge, afin de simplifier l'estimation du rendement. C'est pour une raison semblable qu'on ne comprend pas ces pertes dans le rendement d'un générateur monté sur l'arbre même du moteur qui l'entraîne.

Lorsqu'une machine comporte un appareil auxiliaire, une excitatrice par exemple, la puissance perdue dans cette dernière n'est pas imputée à la machine principale, mais à l'ensemble de celle-ci et de l'excitatrice. Le rendement de l'ensemble doit alors être distingué du rendement de la machine proprement dite.

Le rendement peut être obtenu en mesurant séparément toutes les pertes et en ajoutant ou en soustrayant ensuite leur somme suivant qu'il s'agit d'une puissance débitée ou d'une puissance absorbée. Normalement, les pertes doivent être déterminées à la température de régime ou ramenées à cette température.

Échauffement. — En service régulier, la température d'un appareil électrique ne doit jamais atteindre une valeur pouvant amener la détérioration des matières isolantes.

La façon la plus exacte d'évaluer l'élévation de la température moyenne des conducteurs en cuivre consiste à noter l'augmentation de leur résistance électrique pour appliquer la formule

$$R_{t'} = R_t [1 + 0{,}004 (t' - t)],$$

d'où l'on tire

$$t' - t = 250 \frac{R_{t'} - R_t}{R_t}.$$

Si l'on veut connaître la température maxima atteinte par le fil d'un électro-aimant, on enfouit des couples thermo-électriques à différents endroits dans l'enroulement. La plus haute

température se manifeste ordinairement en un point plus rapproché du noyau que de la surface extérieure de la bobine.

Les résultats ainsi trouvés sont sensiblement plus grands que ceux auxquels conduit un thermomètre mis en contact avec les parties accessibles. Lorsqu'on utilise ce dernier instrument pour prendre la température d'une surface échauffée, on l'applique sur celle-ci en protégeant le réservoir par un tampon de coton contre le rayonnement. On choisit de préférence un thermomètre à petite capacité mercurielle, afin d'obtenir plus rapidement l'équilibre de température, et l'on en garnit le réservoir de papier d'étain, pour rendre le contact plus parfait.

Voici, à titre de comparaison, des chiffres relevés sur un électro-aimant de machine :

température extérieure au contact d'un thermomètre . 48° C
» moyenne déduite de la résistance . . . 72°
» intérieure maxima indiquée par un couple 77°

Les élévations de température renseignées supposent habituellement que la température de la salle d'expérience ne dépassait pas 35° C, que la pression atmosphérique correspondait à 760 mm de mercure et que les conditions de ventilation étaient normales. Les appareils essayés ne peuvent ni être mis dans un courant d'air, ni être enfermés, à moins de stipulations contraires, mais leurs enveloppes et couvercles de service doivent être en place.

Le thermomètre mesurant la température de la salle sera soustrait aux radiations calorifiques des corps chauds et tenu à l'abri des courants d'air. On le suspend généralement à la hauteur de l'axe de la machine examinée et à une distance de 1 m de celle-ci. On note la moyenne de ses indications pendant le dernier quart d'heure de l'essai d'échauffement.

Le fonctionnement de l'appareil contrôlé doit être prolongé jusqu'à ce que sa température soit devenue pratiquement constante. Une durée de 6 à 18 heures est nécessaire suivant le volume et la construction de l'appareil. On peut toutefois abréger l'expérience en faisant fonctionner celui-ci pendant un certain temps en surcharge, pour revenir ensuite au régime normal maintenu jusqu'à l'obtention d'une température inva-

riable. Un thermomètre fixé à demeure contre la partie immobile d'une machine à l'essai permet de dresser la courbe montrant les variations de la température avec le temps et de juger du moment où l'équilibre thermique est atteint.

Pour les appareils à usage intermittent, comme les moteurs de tramway, les rhéostats de démarrage, etc., l'élévation de température est mesurée après une durée de fonctionnement plus courte et dépendant de la nature du service.

Les limites d'élévation de température tolérées sont indiquées dans un tableau à la fin de ce volume. Elles s'étendent de 50° à 100° C, suivant les organes considérés et les modes d'essai.

Isolement et rigidité diélectrique. — La résistance d'isolement n'a qu'une importance secondaire comparativement à la rigidité diélectrique des substances employées comme isolants. Son contrôle est néanmoins le premier essai qu'on effectue à l'atelier sur une machine terminée. Il révèle des défauts qui, dans une épreuve sous tension élevée, pourraient entraîner des ruptures de diélectrique. Si la machine est humide, il faut la dessécher au préalable, en la portant à l'étuve quand ses dimensions s'y prêtent, sinon en l'échauffant par effet Joule à l'aide d'un courant de bas voltage.

La vérification de l'isolement peut s'opérer au moyen d'un ohmmètre. Quand on n'a pas un tel instrument à sa disposition, on se sert d'un voltmètre de résistance r connue. On commence alors par déterminer la force électromotrice E du générateur d'essai, qui est ordinairement une dynamo de l'usine, dont la résistance intérieure est négligeable. On raccorde ensuite un des pôles de la source à la masse de la machine essayée, tandis qu'on relie l'autre au circuit à éprouver par l'intermédiaire du voltmètre, qui marque dans ces conditions une tension v. Si i désigne le courant de perte traversant le voltmètre et x la résistance d'isolement cherchée, on a

$$v = ir = \frac{E}{r + x} r, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{E - v}{v} r.$$

La résistance d'isolement doit, autant que possible, être mesurée avec la tension de service. Dans le cas de machines

à haut voltage, il est parfois nécessaire de recourir à de petits transformateurs pour obtenir la différence de potentiel requise.

On exige habituellement que l'intensité du courant de perte n'excède pas un tantième de celle du courant normal. Quelquefois on spécifie une limite minima de résistance, telle que 1 mégohm.

La rigidité diélectrique se contrôle au moyen d'une tension alternative élevée. L'essai a lieu à l'atelier, quand les isolants sont secs et après avoir amené l'appareil examiné à sa température de régime. Le voltage d'expérience est appliqué entre les enroulements et la masse, de même qu'entre les divers enroulements indépendants. La durée d'application varie de 1 à 30 minutes, suivant les pays.

La différence de potentiel requise est généralement fournie par un transformateur statique et estimée par un voltmètre électrostatique. Une sûreté fusible est intercalée dans le circuit primaire, en vue d'interrompre le courant si le diélectrique éprouvé est percé. On peut aussi éviter une intensité excessive en insérant une résistance convenable, des lampes à incandescence en série par exemple, dans le circuit secondaire. Si le l'isolant essayé cède, les lampes s'allument. On se prémunit contre les surtensions accidentelles en dérivant sur les bornes secondaires deux aiguilles, dont les pointes sont à une distance telle qu'une étincelle éclate entr'elles pour une différence de potentiel supérieure de 10 pour 100 au voltage prescrit.

Nous renvoyons au tableau comparatif donné à la fin de ce volume pour l'indication des tensions d'épreuve imposées. Le principe admis est que la surtension exigée doit diminuer à mesure que le voltage de service augmente, pour les raisons développées au chap. XXIII, à propos des essais de rigidité diélectrique. Les enroulements à courant continu ne sont soumis qu'aux 7/10es des différences de potentiel efficaces auxquelles on soumet les enroulements à courants alternatifs.

Puissance nominale et surcharges. — Les puissances s'expriment habituellement en kilowatts. La puissance nominale des appareils à courants alternatifs est souvent rapportée

à une charge où le courant et la tension aux bornes sont en phase. On renseigne cette puissance apparente en kilovolts-ampères, pour la distinguer de la puissance normale réelle, qu'on indique en kilowatts avec mention du facteur de puissance correspondant.

Il convient de distinguer la puissance dont une machine, telle qu'un moteur de traction ou de levage, est capable en service continu de celle qu'on peut lui demander en service intermittent ou momentané.

A moins de convention contraire, les garanties s'appliquent au régime nominal.

Les appareils doivent pouvoir supporter des surcharges raisonnables, sans être endommagés par échauffement ou étincelles. Il faut qu'avec les surcharges suivantes la température ne dépasse pas de plus de 15° C celle spécifiée pour la charge normale : générateurs, 25 pour 100 pendant une demi-heure ; moteurs, commutatrices et transformateurs, 40 pour 100 pendant trois minutes.

Les machines doivent tolérer, pendant cinq minutes, une vitesse supérieure de 15 pour 100 à celle de régime, avec l'excitation normale et sans excitation.

Précautions à prendre. — Dans les essais de dynamos et transformateurs susceptibles de produire des tensions élevées, il est indispensable de s'entourer de toutes les précautions propres à éviter des accidents aux personnes et aux appareils. Les opérateurs se tiendront sur du bois sec ou des feuilles de caoutchouc et se protègeront les mains par des gants de caoutchouc. On veillera à ce que les instruments de mesure ne puissent être traversés par des courants dangereux. Dans une première expérience, il ne faut jamais fermer un circuit sans en avoir shunté l'ampèremètre par une clef de court-circuit. Si un voltmètre est branché sur un électro-aimant, tel qu'un inducteur de machine, on ne coupera pas le courant de ce dernier avant d'avoir ouvert la dérivation du voltmètre, qui pourrait autrement être brûlé par l'extra-courant.

Chapitre XXXI.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Essais antérieurs à la construction d'une dynamo. — Avant la construction d'une dynamo, il est essentiel de contrôler la conductibilité électrique des fils de cuivre destinés aux enroulements, ainsi que la perméabilité magnétique des métaux utilisés pour la carcasse. Les tôles d'induit doivent, en outre, être essayées au point de vue des pertes par hystérésis et par courants de Foucault. On aura égard à ce que ces pertes atteignent dans une machine en charge des valeurs plus grandes que celles relevées sur une éprouvette avec les mêmes inductions moyennes, à cause des déformations de flux. On trouve parfois jusque trois fois plus.

Lorsqu'on étudie un nouveau type de machine, il faut rechercher la distribution du flux magnétique, afin de déterminer le coefficient de dispersion intervenant dans l'équation du circuit magnétique établie suivant la méthode de MM. Hopkinson. Cette recherche peut se faire avant le bobinage.

Considérons, par exemple, une dynamo bipolaire dont l'inducteur est un électro-aimant en fer à cheval, dans lequel on distingue les noyaux entourés de bobines magnétisantes provisoires, la culasse et les pièces polaires. Cet électro-aimant

constitue avec l'induit un circuit magnétique traversé par un flux dû au courant d'excitation. Ce flux ne reste pas entièrement confiné dans la carcasse de la machine : comme celle-ci est environnée d'air, de cuivre et d'autres substances perméables dans une certaine mesure, il existe des dérivations magnétiques assez complexes, particulièrement autour de l'armature, entre les pièces polaires.

Pour estimer les dispersions de flux correspondant à une certaine excitation, obtenue au moyen d'une source d'électricité indépendante, on opère généralement comme suit. On enroule autour du milieu d'une des bobines magnétisantes une spire de fil conducteur raccordée à un galvanomètre balistique et on supprime brusquement le courant inducteur. On observe ainsi une élongation liée à la variation du flux magnétique embrassé par la spire. Cette variation représente le flux total dans un noyau diminué du flux rémanent, lequel est minime et peut être négligé. On répète ensuite l'expérience avec d'autres spires entourant la culasse, une pièce polaire et l'induit. Les rapports des élongations successives du galvanomètre à l'élongation constatée dans la première mesure sont égaux aux rapports des flux dans les diverses parties de la machine au flux dans un noyau, si la résistance du circuit de décharge peut être considérée comme constante, les aires des spires d'essai étant d'ailleurs indifférentes.

Dans les noyaux bobinés de l'inducteur, le flux vaut 1,2 à 2 fois le flux à travers l'induit, suivant les types de dynamos.

Le procédé ci-dessus exige un galvanomètre à très longue période, pour éviter de graves erreurs dans les mesures. La méthode suivante est plus commode. On enroule en sens inverses quelques spires de fil de cuivre isolé autour d'un des noyaux de l'inducteur et autour de la partie correspondante de l'induit, fig. 266. On ferme leur circuit à l'aide d'un millivoltmètre raccordé aux spires par des aiguilles que l'on pique à travers l'isolant du fil. On déplace les points de contact jusqu'à ce que les extra-courants, induits dans les deux groupes de spires opposées par la suppression de l'excitation, se neutralisent de manière à ne plus influencer l'appareil. Soient

alors n_1 et n_2 les nombres de spires agissantes, éventuellement fractionnaires : on a, en désignant par ν le coefficient d'Hopkinson,

$$\nu \mathfrak{N} n_1 = \mathfrak{N} n_2, \qquad \text{d'où} \qquad \nu = n_2 / n_1.$$

On peut aussi se contenter d'une ou deux spires sur l'inducteur et l'induit, en établissant l'équilibre suivant un dispositif analogue à celui de Poggendorff ou de Lacoine, chap. IX, où les tâtonnements portent sur des résistances de réglage.

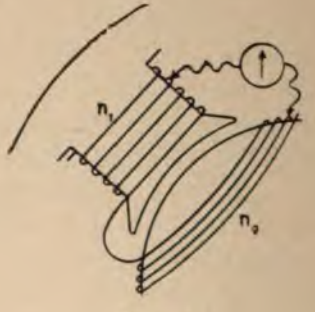


Fig. 266.

Avant de mettre les bobines inductrices et les sections induites en place, il est bon de procéder à la vérification de leur fabrication. Dans ce but, on passe ces enroulements sur le noyau feuilleté d'un électro-aimant excité par un courant alternatif. En cas de court-circuit entre les spires éprouvées, il naît dans celles-ci un courant secondaire excessif provoquant un échauffement de nature à déceler le défaut.

Il est utile de contrôler de nouveau l'état d'isolement des sections induites quand elles sont posées dans les rainures de l'armature, sans être encore raccordées au collecteur. On peut, à cet effet, appliquer, par l'intermédiaire d'un voltmètre, une tension d'essai entre les enroulements et la masse du noyau. Un autre moyen consiste à appuyer sur celui-ci les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval engendrant un flux alternatif. Si les spires induites présentent des contacts, dus par exemple à l'écrasement de l'isolant, elles deviennent ainsi le siège d'un

courant secondaire se manifestant par un échauffement perceptible à l'odorat ou au toucher.

Essais postérieurs à la construction. — Les essais effectués après la construction d'une dynamo sont principalement la mesure de la résistance des différentes parties du circuit électrique, la vérification de l'isolement et de la rigidité diélectrique, le relevé de la température de régime, la détermination du rendement et l'estimation des diverses pertes intérieures.

Dans une machine à courant continu, les pertes à ajouter à la puissance utilisable pour obtenir la puissance totale absorbée se décomposent comme suit : *a)* frottements dans les coussinets, sous les balais et par ventilation; *b)* déchets par hystérésis dans le fer et par courants de Foucault dans le fer et le cuivre; *c)* effet Joule dans l'induit, y compris les contacts des balais; *d)* effet Joule dans l'inducteur, y compris le rhéostat d'excitation s'il fait partie intégrante de la machine et ne peut être supprimé en fonctionnement normal.

Quand une dynamo arrive à la plate-forme d'essai, il convient de la faire tourner d'abord comme moteur à vide avec une vitesse croissante, afin de procéder à une série de constatations mécaniques et électriques. On a eu soin de vérifier au préalable si les paliers ont reçu la quantité d'huile voulue, si les porte-balais et les balais sont bien fixés, si les connexions sont convenablement serrées, si l'isolement est bon.

Au point de vue mécanique, on examine si les bagues de graissage répandent comme il faut l'huile sur les tourillons, si l'induit ne frotte pas contre les pôles de l'inducteur ou contre les paliers, si le collecteur tourne rond, si le jeu longitudinal de l'armature est satisfaisant, si l'entrefer est uniforme sous les pièces polaires, s'il n'existe pas de balourd donnant lieu à des vibrations et des chocs. L'échauffement des paliers dans le fonctionnement à vide peut résulter d'un montage défectueux, ainsi que de l'emploi d'huile de mauvaise qualité ou contenant des impuretés.

Parfois les variations magnétiques des dents de l'induit concordent avec la période propre de celles-ci, ce qui se traduit

par un son plus ou moins aigu pouvant présenter des inconvénients. Il est possible d'y remédier par un frettage de la denture ou une modification de la vitesse de rotation.

Au point de vue électrique, diverses fautes peuvent se manifester. Des crachements indiquent un mauvais calage des balais, une erreur dans les liaisons entre l'enroulement induit et le collecteur, un défaut dans les électros. Des anomalies proviennent quelquefois de l'humidité des conducteurs, du déversement de l'huile des paliers sur le collecteur. L'échauffement anormal d'une ou plusieurs sections induites dénote un court-circuit dans celles-ci. Si les pôles inducteurs ne sont pas alternativement de noms contraires, ce qu'accuse une aiguille aimantée, le courant de démarrage est exagéré. Une interruption ou un contact dans les bobines magnétisantes peut amener le même résultat.

Après l'expérience à vide, on met la machine progressivement en charge, éventuellement comme génératrice. S'il s'agit d'une excitation en série, il faut, dans ce dernier cas, croiser les connexions de l'inducteur ou changer le sens de rotation, pour obtenir l'amorcement par le magnétisme rémanent. Avec une dynamo neuve n'ayant pas tourné comme moteur à vide, il est nécessaire de commencer par envoyer un courant indépendant dans le circuit d'excitation pour qu'elle puisse s'amorcer comme génératrice.

L'application de la charge permet de juger définitivement des défectuosités électriques de la machine, qui sont mises en évidence par une élévation de température ou des étincelles de commutation inadmissibles. Ces effets peuvent tenir à une conception vicieuse de la dynamo, à des densités de courant trop fortes, à une réaction d'induit exagérée, à des inégalités entre les flux dans les divers circuits magnétiques, à un collecteur ou des balais insuffisants ou mal entretenus.

La circulation du courant normal dans l'induit détermine parfois des accidents mécaniques, qui ne se manifestent pas dans la marche à vide, tels les ruptures de soudures entre les sections de l'armature et les lames du collecteur ou de fils imparfaitement soutenus contre la force centrifuge.

Mesures de résistance. — La résistance d'isolement et la rigidité diélectrique d'une dynamo se contrôlent par les procédés étudiés précédemment.

Pour l'évaluation des pertes par effet Joule en service normal, la résistance électrique des diverses parties de la machine doit être déterminée à chaud, après établissement de la température de régime.

Les parties présentant une résistance assez élevée, comme l'enroulement inducteur d'une dynamo excitée en dérivation, peuvent être essayées au pont de Wheatstone. Pour les parties de faible résistance, on obtient plus d'exactitude par le double pont de Kelvin ou une méthode équivalente. En opérant sur des électro-aimants, il faut tenir compte de la durée de la période variable, une mesure trop rapide pouvant entraîner une erreur importante. Souvent, on envoie dans la résistance à estimer un courant évalué à l'aide d'un ampèremètre et l'on relève au moyen d'un voltmètre la différence de potentiel extrême. Quand un voltmètre est ainsi dérivé sur un enroulement d'électro-aimant, il faut éviter de rompre le circuit principal avant d'avoir déconnecté l'instrument, de peur de brûler celui-ci par un extra-courant. Pour prévenir toute erreur, on protègera le voltmètre par un interrupteur à ressort, qu'il faut tenir abaissé pendant les lectures. Afin de soustraire l'ampèremètre aux intensités dangereuses, on peut le shunter par une clef qu'on n'ouvre que pour les observations. Un autre moyen, usité pour la mesure des petites résistances, consiste à comparer les déviations d'un galvanomètre très résistant, qu'on relie successivement aux extrémités du circuit examiné et aux bornes d'une résistance étalon traversée par le même courant.

Dans le calcul des pertes par effet Joule, il faut prendre en considération, non seulement la résistance de l'induit proprement dit, mais aussi celle des balais, dont le contact avec le collecteur absorbe parfois, surtout quand il s'agit de frotteurs en charbon, une différence de potentiel notable. Il peut y avoir, en outre, une résistance anormale entre les tiges de support des balais et ceux-ci, par suite d'un montage défectueux.

En vue de déterminer séparément ces diverses résistances,

on fait passer dans la dynamo, après suppression du circuit d'excitation, un courant indépendant réglé par un rhéostat et mesuré au moyen d'un ampèremètre, tandis qu'on évalue, à l'aide d'un voltmètre, la chute de tension entre les tiges et les balais, entre ceux-ci et le collecteur, ainsi que dans l'armature.

Pour relever la chute de tension entre les balais et le collecteur, on relie le voltmètre, d'une part, à l'un des premiers et, d'autre part, à un frotteur auxiliaire, convenablement isolé et appuyant sur les mêmes lames du collecteur que le balais principal utilisé. Quand chaque tige porte plusieurs balais, on peut isoler un de ceux-ci de son support par de la toile huilée, pour le faire servir de frotteur auxiliaire, mais il faut alors tenir compte de la réduction de la surface de contact utile. Dans l'étude d'une nouvelle machine, il est utile de répéter l'essai en variant la nature des balais, l'intensité du courant, la pression sur le collecteur et la vitesse de rotation. Avec des balais métalliques, la résistance de contact, d'abord indépendante du courant, décroit lorsque la densité dépasse 5 ampères par cm^2; avec des frotteurs en charbon, elle commence par diminuer à mesure que la densité s'approche de 15 ampères par cm^2 et, au delà, elle augmente. Une pression croissante affaiblit la résistance de contact jusqu'à une certaine limite en rapport avec l'échauffement du collecteur. L'effet de la vitesse sur la résistance de contact est nul, si le collecteur tourne bien rond. Un procédé commode, quelquefois employé pour examiner l'influence de ces divers éléments, consiste à isoler deux balais montés sur la même tige et appuyant sur les mêmes lames du collecteur, à faire passer entre ces frotteurs un courant connu et à noter leur différence de potentiel, qui représente sensiblement la chute ohmique due au double contact. Dans les expériences courantes, il convient d'opérer avec la pression et la densité normales.

La résistance de l'induit proprement dit s'estime en appuyant directement sur le collecteur au repos, à côté de deux balais de polarités opposées, les extrémités des fils de cuivre connectés au voltmètre.

Parfois, on mesure la résistance r entre deux lames du col-

lecteur choisies de manière à partager l'enroulement induit en deux parties égales et l'on calcule la résistance combinée de l'armature, offrant en service $2c$ dérivations, par l'expression r/c^2. Le tableau suivant renseigne, en lames du collecteur, l'écartement y_m des axes des lames correspondantes qui délimitent ainsi deux moitiés. K y désigne le nombre total de lames et y_k l'intervalle, également compté en lames, séparant les raccords semblables au collecteur de deux bobines reliées directement entr'elles dans l'enroulement.

K	y_k	y_m
pair	impair	$\frac{K}{2}$
impair	pair	$\frac{y_k}{2}$
	impair	$\frac{K \pm y_k}{2}$

Dans le cas d'enroulements multiples distincts, au nombre de m, le tableau est applicable à l'un d'eux si l'on prend comme unité, non pas une lame, mais m lames, et l'expression de la résistance combinée de l'armature devient r/mc^2.

Quand on désire simplement connaître la résistance totale de régime entre les porte-balais de polarités contraires, on détermine la différence de potentiel à appliquer à ceux-ci pour faire passer le courant normal dans l'induit entraîné, sans excitation, à vitesse réduite. Pour éliminer l'influence de la force électromotrice due au magnétisme rémanent de l'inducteur, on intervertit le sens du courant et l'on adopte la moyenne des deux résultats trouvés.

Vérification d'un induit. — Pendant le fonctionnement d'une dynamo bipolaire, les potentiels des lames du collecteur vont en croissant, des deux côtés de la ligne neutre, à partir des balais négatifs jusqu'aux balais positifs. Supposons les balais négatifs maintenus au potentiel zéro par une liaison électrique avec le sol, tandis que les balais positifs sont isolés, la machine tournant comme génératrice à circuit extérieur

ouvert, et portons, sur le prolongement des rayons du collecteur correspondant aux diverses lames, des longueurs proportionnelles aux potentiels de celles-ci. Nous obtiendrons ainsi une courbe symétrique par rapport à la ligne neutre, du genre de celle représentée dans la fig. 267.

Pour déterminer rapidement les points de cette courbe polaire, on raccorde les balais négatifs à l'une des bornes d'un voltmètre, dont l'autre borne communique avec un petit frotteur auxiliaire. On appuie ce dernier sur le collecteur en l'écartant progressivement des balais négatifs et en réglant les écarts de

Fig. 267.

manière à comprendre successivement une section induite de plus dans le circuit de mesure. Les déviations de l'instrument fournissent directement les ordonnées du diagramme.

On peut aussi relever les différences des ordonnées consécutives, en connectant le voltmètre à deux frotteurs auxiliaires, maintenus à la distance des axes de deux lames contiguës et posés successivement sur les diverses régions du collecteur mobile. Dans ce cas, il est utile d'intercaler une forte self-induction dans le circuit de mesure, pour supprimer les oscillations de l'appareil.

Le diagramme des potentiels ci-dessus permet de contrôler la régularité du champ magnétique de l'entrefer. Un défaut à cet égard se traduit par une déformation de la courbe.

Appliqué à une armature multipolaire en parallèle, il donne le moyen de s'assurer si les diverses dérivations développent la même force électromotrice. Très souvent, en effet, par suite d'une défectuosité de l'inducteur ou d'un décentrage de l'in-

duit, on constate entre les différentes tensions des inégalités susceptibles de produire des courants dans l'induit tournant à circuit ouvert avec les balais de même nom réunis entr'eux. On peut mettre ces courants parasites en évidence à l'aide d'ampèremètres insérés entre les groupes de balais de même polarité.

On peut constater directement une inégalité éventuelle des flux inducteurs en se servant d'un galvanomètre balistique relié à une spire de fil qu'on enroule successivement autour des diverses pièces polaires. Cette inégalité tient parfois à une différence dans les nombres d'ampères-tours des bobines excitatrices. Un contrôle rapide de celles-ci consiste à comparer leurs chutes de potentiel.

La différence de deux ordonnées voisines du diagramme des potentiels au collecteur étant proportionnelle à l'intensité moyenne du champ de l'entrefer dans la région correspondante, il est possible de déduire de cette courbe la répartition du flux magnétique autour de l'induit. Mais on procède plus souvent autrement pour étudier le champ de l'entrefer. Quand l'armature est immobile, on peut appliquer l'une des méthodes indiquées au chap. XVIII, par exemple la variation de résistance électrique du bismuth ou l'induction électromagnétique dans une bobine longue et étroite qu'on retire brusquement de l'entrefer. Pour examiner, dans ces conditions, l'influence de la réaction d'induit, il suffit d'envoyer dans l'armature un courant emprunté à une source indépendante. L'exploration du champ avec la machine en marche peut se faire en fixant une ou plusieurs spires d'essai à l'induit et en utilisant un dispositif analogue à celui de M. Joubert, que nous décrirons à propos des alternateurs, pour relever la force électromotrice développée dans ces spires au moment précis de leur passage par un endroit déterminé de l'entrefer.

Pour vérifier les diverses sections de l'enroulement d'un induit, on envoie dans celui-ci au repos un courant constant accédant par les balais. Un millivoltmètre est mis en communication par deux frotteurs auxiliaires avec les lames contiguës successives du collecteur. Les différences de potentiel obser-

vées doivent être égales. Un court-circuit dans une section s'accuse par un voltage réduit. Une interruption maintient l'appareil au zéro jusqu'au moment où les frotteurs touchent les deux lames correspondant à la section endommagée. S'il y a plusieurs ruptures, le millivoltmètre ne dévie pour aucune des positions des frotteurs écartés à la distance de deux lames jointives ; mais, quand on sépare progressivement les frotteurs, il arrive un moment où une déviation décèle la partie défectueuse.

Un contact entre une section induite et la masse peut se localiser de la façon suivante. Un courant passant comme ci-dessus à travers l'armature immobile, on touche successivement les diverses lames du collecteur avec un conducteur connecté à un voltmètre communiquant d'autre part avec la carcasse de la machine. La déviation de l'instrument passe par un minimum quand on rencontre l'une des lames limitant la section fautive.

Caractéristiques des machines à courant continu. — *Caractéristique à circuit ouvert.*

La caractéristique à circuit ouvert représente la force électromotrice E_0 d'une dynamo, dont le circuit extérieur est interrompu, en fonction du courant d'excitation i_e, à la vitesse angulaire normale et avec les balais calés invariablement dans la position de pleine charge sans étincelles. Elle a la forme de la courbe du magnétisme.

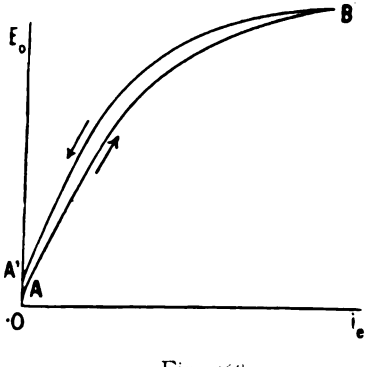


Fig. 268.

Avec une excitation croissante, on obtient une ligne AB, fig. 268, qui part d'un point voisin de l'origine, l'ordonnée OA mesurant la force électromotrice due à l'aimantation rémanente ; à une excitation décroissante correspond une ligne BA', dont l'ordonnée OA' accuse un magnétisme résiduel un peu plus grand. Il faut faire augmenter et diminuer très régulièrement le courant inducteur pour constater les différences indiquées. C'est la courbe moyenne, tracée par interpolation, qu'on considère habituellement.

Les machines en série exigent, pour l'expérience dont il s'agit, que l'inducteur soit alimenté par une source indépendante. Les machines en dérivation donnent aussi sensiblement la tension cherchée en fonctionnant à auto-excitation, car la chute de potentiel dans la résistance de l'armature et la réaction d'induit provoquées par le courant magnétisant dérivé sont en général très minimes.

On effectue l'essai en observant un voltmètre relié à l'induit et un ampèremètre traversé par le courant gradué passant dans l'inducteur. La vitesse s'estime au moyen d'un tachymètre ou d'un compte-tours, suivant les indications données au chap. II. Avec les petites dynamos, où la pression de l'instrument peut introduire un frottement supplémentaire modifiant la vitesse, il est recommandable d'attacher un compte-tours à l'arbre par un ressort à boudin, pour noter le temps correspondant à un nombre déterminé de révolutions.

On dresse un tableau portant en tête les renseignements généraux, tels que la date, la température ambiante, le n° et les données de la machine étudiée, la nature des balais, les n^{os} des appareils de mesure et les constantes ou corrections de ceux-ci. Dans les colonnes successives on inscrit les n^{os} d'ordre des observations, les nombres de tours par minute, les lectures à l'ampèremètre et les intensités rectifiées, les lectures au voltmètre et les tensions corrigées. Une colonne spéciale est réservée pour l'enregistrement des particularités de l'essai.

Les mesures aux divers appareils doivent se faire simultanément et il est bon de les recommencer au moins trois fois pour chaque point du diagramme, afin d'arriver à des moyennes autant que possible exemptes d'erreurs accidentelles.

S'il n'est pas possible de réaliser la vitesse imposée, on peut, pour de faibles écarts, calculer par interpolation la force électromotrice qui y correspond, car, à circuit ouvert, la tension induite est proportionnelle à la vitesse.

Voici un procédé permettant de construire la caractéristique à circuit ouvert d'une grande dynamo qu'on ne peut pas faire marcher comme génératrice, mais bien comme moteur à vide. Il est basé sur la connaissance de la courbe figurant la vitesse N en fonction de l'intensité i_e du courant d'excitation, quand l'armature non chargée est soumise à une différence de potentiel égale à la tension normale E_n de la machine. On sait que, d'une manière générale, la force électromotrice induite E_0 est liée à la vitesse et au courant inducteur par une équation de la forme

$$E_0 = K N i_e. \qquad (1)$$

Si l'on a relevé expérimentalement la courbe

$$N = f(i_e) = \frac{E_n}{K i_e},$$

on peut déduire des coordonnées de ses points les valeurs de K correspondant aux diverses excitations et calculer d'après (1) les variations de E_0 avec i_e pour une vitesse donnée.

Caractéristique extérieure.

La caractéristique extérieure représente la différence de potentiel aux bornes d'une dynamo en fonction du courant fourni au circuit extérieur à la vitesse angulaire normale.

Pour trouver les points de cette courbe, on raccorde la machine à des résistances d'utilisation variables par degrés et l'on observe un voltmètre dérivé sur les bornes, ainsi qu'un ampèremètre intercalé dans le circuit extérieur.

On a vu dans les *Leçons sur l'Électricité* (7e édition, t. I, chap. XLV) comment on déduit du diagramme considéré les résistances et puissances relatives aux divers régimes.

Pour une même abscisse, fig. 269, la différence entre les ordonnées de la caractéristique à circuit ouvert AE_0 et de la caractéristique extérieure AV d'une machine en série figure

la chute de tension due à la résistance intérieure et à la réaction d'induit.

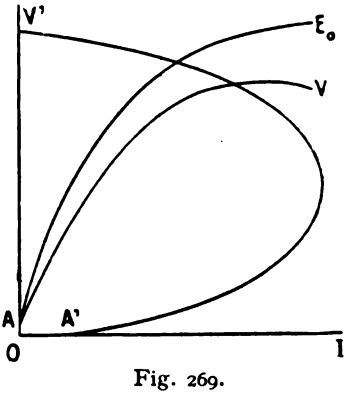


Fig. 269.

Dans le cas d'une dynamo en dérivation, la caractéristique extérieure V'A' s'abaisse progressivement pour revenir vers un point A', distant de l'origine d'une quantité O A' qui représente le courant extérieur à résistance utile nulle, c'est-à-dire le courant engendré dans l'induit en court-circuit par le magnétisme rémanent de l'inducteur.

Caractéristiques de réaction d'induit.

On obtient une telle courbe A V, fig. 270, en représentant

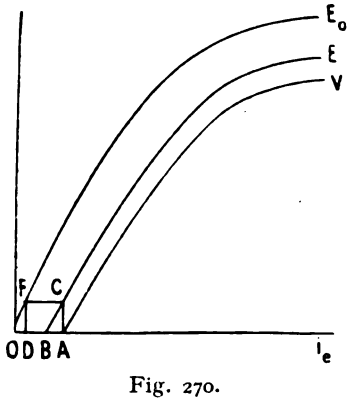


Fig. 270.

la différence de potentiel aux balais en fonction du courant

inducteur, emprunté à une source indépendante, dans le cas de la vitesse angulaire normale et d'un réglage de la résistance extérieure à l'armature conservant au courant débité une intensité invariable, celle de pleine charge par exemple.

Les ordonnées de AV diffèrent de celles de la caractéristique à circuit ouvert FE_0 de quantités qui, pour le débit considéré, figurent les valeurs de la chute de potentiel totale dans l'induit. En y ajoutant la chute ohmique, calculable si l'on connaît la résistance de l'armature entre balais, il vient une courbe CE, dont les ordonnées sont inférieures à celles de FE_0 de quantités déterminant les valeurs de la chute de tension due à la réaction d'induit.

La chute ohmique étant constante, la verticale AC se déplace parallèlement à elle-même en conservant ses extrémités sur AV et CE.

L'abscisse OA, qui constitue un élément expérimental important, correspond à l'excitation requise pour entretenir le courant envisagé dans l'armature en court-circuit. Cette excitation comporte une partie OD, nécessaire pour développer la force électromotrice $DF = AC$ à circuit ouvert, et une partie DA servant à vaincre la réaction d'induit.

Il est à noter que l'excitation FC compensant la réaction d'induit ne reste pas invariable quand le voltage croît : la distance horizontale des lignes FE_0 et CE va en augmentant à mesure que la machine s'aimante davantage.

Il est possible, par un essai de court-circuit, d'estimer approximativement le courant maximum qu'une dynamo peut fournir sans étincelles excessives au collecteur. Dans cette expérience, le flux transversal est sensiblement le même qu'en charge, si l'on fait abstraction du changement de reluctance résultant d'une saturation magnétique différente vers les cornes polaires, où le flux transversal s'ajoute au flux inducteur.

Plus loin, on montrera l'utilité, en vue de la détermination du rendement, d'observer la puissance dépensée pour produire le courant normal en court-circuit.

Pendant les essais à circuit fermé, on dresse des tableaux analogues à celui relatif au fonctionnement à circuit ouvert, en

inscrivant dans des colonnes distinctes les lectures et les valeurs réduites correspondant aux divers appareils de mesure et en signalant dans une colonne spéciale les circonstances particulières des expériences.

Connexions convenant au relevé des caractéristiques.

La fig. 271 montre, à titre d'exemple, les combinaisons qui peuvent être adoptées dans le cas d'une dynamo en dérivation conduite par un électromoteur shunt.

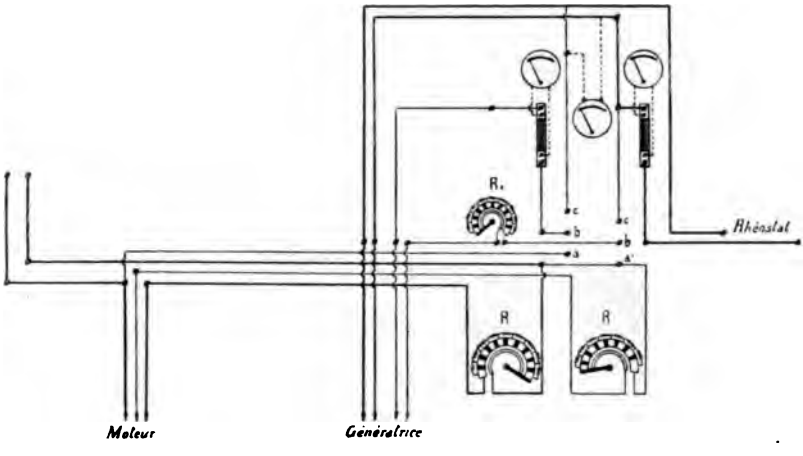


Fig. 271.

Après s'être assuré que les contacts de tous les rhéostats de l'installation correspondent à une résistance infinie, on ferme le disjoncteur automatique à maxima qui commande le circuit d'alimentation, on supprime toute résistance au rhéostat d'excitation R′ du moteur, on manœuvre ensuite lentement le rhéostat de démarrage R de celui-ci jusqu'à fond de course et on retouche au rhéostat R′ en vue de régler la vitesse.

Pour tracer la caractéristique à circuit ouvert, on établit les raccords ab et $a'b'$, puis on varie l'excitation de la génératrice en modifiant la résistance du rhéostat de champ R'_1 de cette dernière.

Les liaisons précédentes sont maintenues pour le relevé d'une caractéristique de réaction d'induit. On ferme en outre

l'interrupteur du rhéostat de charge, dont on ajuste la résistance de façon à conserver un débit constant.

Pour la caractéristique extérieure, on remplace les raccords ab et $a'b'$ par les liaisons bc et $b'c'$, afin de réaliser l'auto-excitation.

L'installation permet aussi de construire le diagramme figurant la force électromotrice de la génératrice à circuit ouvert en fonction de la vitesse, pour une excitation donnée. A cet effet, après avoir repris les raccords ab et $a'b'$, on change l'allure du moteur en agissant sur les rhéostats R et R'.

On peut enfin étudier la dépendance du courant d'excitation et du courant extérieur, pour une vitesse et une tension utile invariables. Avec les liaisons bc et $b'c'$, on altère la résistance du rhéostat de charge, en même temps qu'on manœuvre le rhéostat R'_1 de manière à avoir toujours la même différence de potentiel aux bornes.

Courbes caractérisant les moteurs.

Pour les moteurs, on dresse ordinairement les diagrammes montrant les variations de la vitesse, du couple, de la puis-

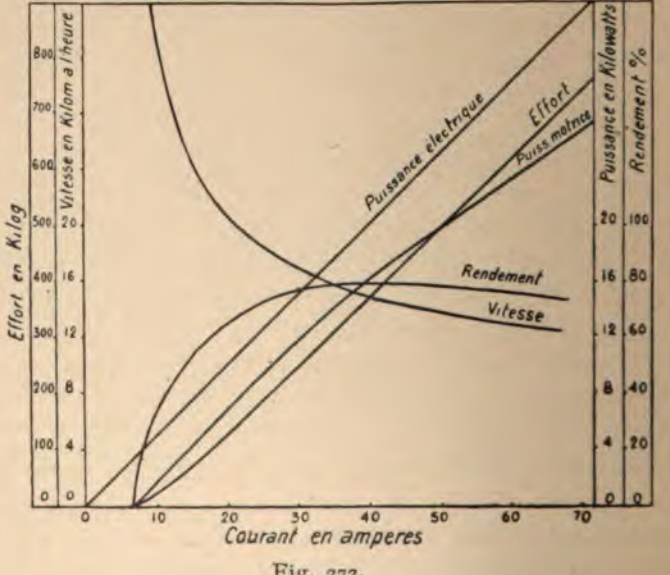


Fig. 272.

sance électrique dépensée, de la puissance motrice développée et du rendement en fonction du courant absorbé sous voltage constant.

Les fig. 272 et 273 représentent de telles caractéristiques relevées sur deux moteurs de tramway, excités respectivement en série et en dérivation. Les efforts, vitesses et puissances motrices sont rapportés à la jante des roues des voitures.

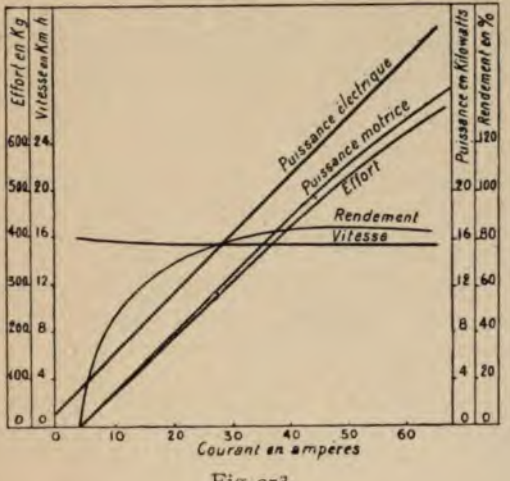


Fig 273.

On charge le moteur essayé au moyen d'un frein, chap. II, ou d'une génératrice tarée, qu'on accouple au moteur à l'aide d'un manchon élastique, la liaison par courroie occasionnant une perte mal définie. Il faut avoir soin de laisser tourner le moteur, protégé par un disjoncteur automatique à maxima, pendant un temps suffisant pour donner à l'huile des paliers sa température normale. On soumet le moteur à sa tension de service, tandis qu'on fait varier la puissance mécanique. On observe le courant d'alimentation et la vitesse pour chaque régime.

Dans un tableau l'on note, en tête, la date, la température ambiante, les données relatives au moteur et aux divers appareils de mesure, puis, dans des colonnes successives, les nos d'ordre des expériences, les nombres de tours par minute,

les différences de potentiel aux bornes, les courants, les puissances électriques calculées, les indications du frein, les puissances utiles, les rendements et les remarques spéciales.

Il est utile de connaître l'effort de démarrage qu'un moteur peut développer avec le courant de pleine charge. A cet effet, on détermine le moment du frein que la machine peut surmonter dans ces conditions. Quelquefois, on fait simplement appuyer sur une balance à poids ou à ressort un levier attaché horizontalement à la poulie du moteur.

La fig. 274 indique des connexions propres à l'étude d'un électromoteur en série, dont la puissance motrice est absorbée

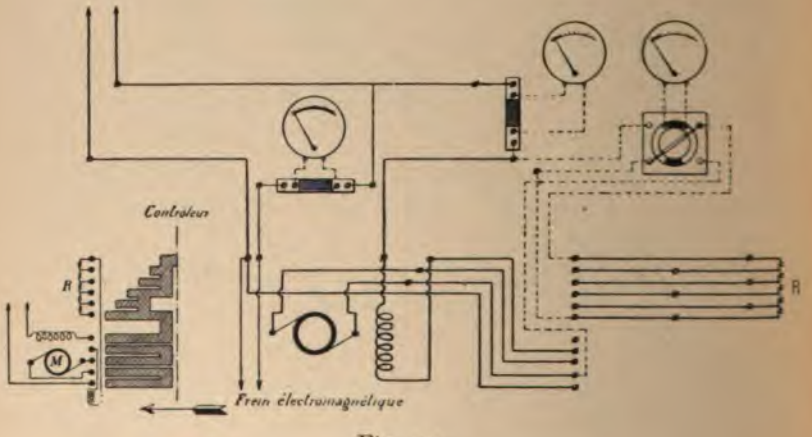


Fig. 274.

par un frein électromagnétique. Après avoir fermé le disjoncteur automatique à maxima qui commande l'installation, on met les résistances de démarrage progressivement en court-circuit, en manœuvrant la manivelle du contrôleur. L'équilibre du frein, pour une position déterminée du poids mobile de cet appareil, s'obtient par le réglage du courant envoyé dans l'électro-aimant de celui-ci. Pour un certain couple résistant imposé au moteur, on peut trouver la relation entre la vitesse et la différence de potentiel agissante en changeant cette dernière à l'aide du contrôleur.

Détermination directe du rendement des dynamos. — *Cas de moteurs mécaniques.*

Un procédé direct d'évaluation du rendement d'une génératrice consiste à déterminer, par des mesures mécaniques, la puissance motrice appliquée à l'arbre de la dynamo, en même temps qu'on estime les watts disponibles aux bornes.

Quand la génératrice est conduite par une machine à vapeur, la puissance mécanique qu'elle absorbe se déduit ordinairement des diagrammes d'indicateur relevés sur cette dernière. Eu égard aux faibles différences entre les frottements d'une machine à vapeur en charge et à vide, on peut admettre, dans un essai approximatif, que la puissance effective d'un tel moteur est égale à l'excès de la puissance indiquée en charge sur la puissance indiquée à vide pour une même vitesse. Si la machine à vapeur attaque indirectement la dynamo, on peut encore considérer, dans une première approximation, les frottements des organes intermédiaires comme indépendants de la charge. Il est essentiel que la vitesse soit invariable pendant les mesures et on attendra, avant de commencer celles-ci, que le groupe électrogène ait tourné pendant un temps suffisant pour donner aux huiles et graisses leur fluidité normale, ces lubrifiants offrant parfois à froid une résistance beaucoup plus élevée qu'à la température de régime. La constance de la vitesse est particulièrement importante dans la marche à vide : vu le faible travail à effectuer dans ces conditions, le volant apporte, pendant un ralentissement d'allure, un appoint sérieux à la vapeur et, lors d'une accélération, celle-ci doit au contraire fournir, outre le travail des frottements, l'énergie, souvent plus considérable, nécessaire pour vaincre l'inertie du volant. La petitesse des diagrammes correspondant à la marche à vide rend le résultat des expériences de ce genre précaire. Une amélioration à ce point de vue consiste à abaisser la pression de la vapeur pour l'obtention de diagrammes plus faciles à surfacer avec précision.

On trouve une valeur plus exacte de la puissance reçue par la génératrice en substituant à celle-ci un frein qui absorbe le travail de la machine à vapeur dans les mêmes circonstances d'admission et de vitesse.

Le dynamomètre de transmission offre un autre moyen de mesurer l'énergie communiquée à la dynamo, mais cet appareil n'est guère applicable qu'aux faibles puissances.

Par suite de la difficulté de séparer entièrement les pertes dans le moteur des pertes dans la génératrice, on convient souvent, en cas de couplage direct, de ne chercher que le rapport de la puissance électrique utile à la puissance indiquée aux cylindres à vapeur, c'est-à-dire le rendement combiné des deux machines.

Quand il s'agit d'une dynamo actionnée par une turbine à eau ou à vapeur, on se contente ordinairement d'évaluer l'eau ou la vapeur consommée, sous la pression de service, par kilowatt-heure recueilli aux bornes de la génératrice.

Les mesures électriques qui accompagnent les mesures mécaniques sont l'estimation de la différence de potentiel aux bornes de la dynamo, le relevé de l'intensité du courant utile et, éventuellement, la détermination de l'intensité du courant d'excitation.

La génératrice est de préférence mise en charge sur des lampes à incandescence ou une résistance artificielle pour courants intenses du genre de celles décrites au chap. IV. Lorsqu'on est obligé de faire l'essai pendant que la dynamo alimente des électromoteurs ou d'autres récepteurs à marche irrégulière, il convient, pour atteindre quelque précision, de faire de nombreuses expériences permettant de prendre des moyennes. Si le voltage présente des fluctuations, on peut admettre approximativement que les pertes dans la dynamo sont proportionnelles au carré de la tension.

Dans l'essai, il est bon d'établir successivement divers régimes de courant, en maintenant la même vitesse et en changeant la résistance extérieure reliée à la dynamo. Pour chaque valeur du débit, on fait des lectures simultanées, également espacées, au voltmètre et à l'ampèremètre, pendant qu'on tire les diagrammes d'indicateur et qu'on contrôle la vitesse, en vue de déterminer la puissance électrique moyenne correspondant à la puissance mécanique. Il est d'ailleurs recommandable de répéter plusieurs fois l'ensemble des

observations pour chaque régime, afin de réduire, par l'adoption de moyennes, l'influence des erreurs accidentelles auxquelles de telles mesures sont exposées. Notons, en passant, que la mesure de la vitesse est une des moins exactes, si l'on borne l'observation à une période trop courte. Aussi, vaut il mieux, avec les machines à vapeur de faible et moyenne vitesse, attacher un compte-tours à l'arbre, pour calculer la vitesse moyenne d'après le nombre de révolutions effectuées pendant toute la durée de la série d'expériences faites avec une même charge, que pousser un instrument à pointeau pendant une minute contre l'extrémité de l'arbre. On termine l'essai en relevant la puissance requise pour faire tourner la dynamo avec son circuit d'utilisation ouvert. On a ainsi toutes les données permettant de dresser la courbe du rendement de la génératrice ou du rendement combiné du groupe électrogène en fonction de la puissance disponible.

La méthode de détermination du rendement dont il vient d'être question est sujette, il ne faut pas se le dissimuler, à des erreurs assez fortes. Les mesures mécaniques ne comportent généralement pas la même précision que les mesures électriques et, comme la puissance mécanique absorbée est obtenue par différence entre la puissance indiquée en charge et la puissance indiquée à vide, des erreurs de sens opposés sur ces dernières quantités peuvent introduire dans l'estimation de leur différence une grande inexactitude. On ne s'étonnera pas de rencontrer des écarts de 2 pour 100 entre des essais de l'espèce exécutés avec des appareils différents par divers expérimentateurs.

Dans le cas d'une dynamo mue par une turbine à vapeur, pour rapporter la puissance électrique recueillie au poids de vapeur consommée, on a habituellement recours à un condenseur par surface, dont l'eau condensée est pesée dans des réservoirs tarés placés sur une bascule. On éprouve généralement un tel groupe électrogène durant quelques heures en pleine charge, puis, pendant un temps plus réduit, à 3/4, 1/2 et 1/4 de charge, de même qu'avec 1/4 et 1/3 de surcharge. A défaut de condenseur par surface, on peut mesurer le poids

d'eau injectée à la chaudière, en prenant les précautions signalées au chap. II.

Emploi d'électromoteurs tarés.

Pour essayer une génératrice de faible ou moyenne puissance, on se sert plus avantageusement d'un moteur électrique, qui l'entraîne, non par courroie, ce qui occasionnerait un déchet difficile à préciser, mais directement, par un accouplement élastique évitant les efforts longitudinaux de nature à accroître les frottements dans les paliers. On commence par tracer la courbe de tarage de l'électromoteur pour la vitesse requise, en portant en abscisses les puissances absorbées sous différence de potentiel constante et en ordonnées les mêmes valeurs diminuées des pertes intérieures correspondantes.

Emploi de freins mécaniques ou électromagnétiques.

Lorsqu'on n'a pas affaire à une très petite dynamo, on peut admettre l'égalité des rendements de la machine fonctionnant, dans des conditions comparables, successivement comme génératrice et comme moteur.

Un essai au frein de Prony peut donc suffire alors pour obtenir le rendement, mesuré par le rapport entre la puissance mécanique sur l'arbre et la puissance électrique fournie par la source d'alimentation. Dans le cas d'une grande dynamo, on ne peut pas utiliser la poulie de service pour l'application du frein ; afin d'éviter un échauffement exagéré, il faut faire usage d'une poulie spéciale à grande surface et refroidie au besoin.

On remarquera qu'une génératrice, dont le rendement a été déterminé au préalable pour diverses valeurs de la vitesse, du courant débité et de la différence de potentiel aux bornes, constitue un excellent frein pour l'étude des moteurs électriques et autres, de simples lectures d'ampèremètre et de voltmètre permettant d'estimer la puissance mécanique absorbée et la majeure partie de celle-ci pouvant être récupérée dans un circuit d'utilisation. Une dynamo peut au surplus fonctionner indéfiniment, tandis qu'un frein ordinaire exige des soins particuliers rendant les expériences de longue durée difficiles. Les petites dynamos ne sont toutefois pas à recommander

comme freins, par suite de l'importance relativement grande de leurs frottements, susceptibles de varier assez fortement avec la pression des balais et le graissage.

Pour les faibles puissances, on construit des freins électromagnétiques sans balais, dont l'induit est un disque de cuivre. On mesure le couple résistant qu'ils exercent en équilibrant par des poids leur inducteur mobile sur couteaux, qui tend à suivre le mouvement du disque.

M. Marcel Deprez et, plus récemment, M. Krebs ont réalisé des dispositifs analogues capables d'absorber la puissance de grands moteurs électriques, tout en permettant de récupérer la plus grande partie de l'énergie dépensée. Le moteur à essayer est réuni à une génératrice-frein, dont l'inducteur, au lieu de reposer sur le sol comme dans les dynamos courantes, peut osciller dans des coussinets à billes fixés à la fondation. Le couple qui tend à entraîner cet inducteur autour de son induit est équilibré à l'aide de poids ou de ressorts agissant sur un levier, dont la course est limitée par des buttoirs. Il représente le couple d'entraînement du moteur, diminué du couple correspondant aux frottements mécaniques de la génératrice, lesquels peuvent être estimés par des expériences spéciales.

Le rôle d'un tel frein peut être interverti. Il est possible d'employer l'appareil comme électromoteur pour actionner une génératrice, le couple mesuré étant alors égal au couple effectif augmenté du couple des résistances de frottement.

Détermination du rendement de dynamos couplées. — *Méthode de MM. Hopkinson.*

Il est possible de réduire l'influence des erreurs entachant les mesures mécaniques en ne faisant porter celles-ci que sur l'énergie dissipée par les pertes intérieures des dynamos essayées. Si ces déchets représentent 10 pour 100 du travail utile et si l'on commet dans leur estimation l'erreur considérable de 5 pour 100, on peut encore obtenir le rendement des machines à 0,5 pour 100 près.

La méthode ci-après est basée sur l'hypothèse de l'égalité très approchée des rendements de deux dynamos identiques

couplées mécaniquement et électriquement, quand l'une fonctionne comme génératrice et l'autre comme moteur, le courant de la première étant envoyé dans la seconde. La puissance motrice nécessaire pour entretenir les deux machines en marche dans ces conditions se réduit à la somme de leurs pertes intérieures.

Les arbres des dynamos sont manchonnés. Si l'on n'est pas certain du maintien de leur alignement, il faut, pour éviter des frottements exagérés dans les coussinets, recourir à un accouplement élastique, tel qu'un manchon Raffard, ou à un ressort à boudin en acier. L'ensemble des deux machines est commandé par une courroie, sur laquelle on dispose un dynamomètre de transmission. Si l'on possède un électromoteur taré comme il a été dit au paragraphe précédent, il vaut mieux l'utiliser pour attaquer directement l'axe du groupe à l'essai.

Lorsque les deux dynamos sont excitées en dérivation, leur association électrique n'offre aucune difficulté et il est aisé de régler les courants inducteurs, par des rhéostats de champ magnétique, de manière que l'une des machines développe une force électromotrice supérieure à celle de l'autre et joue le rôle de génératrice, en débitant sur la seconde machine qui fait l'office de moteur. On fait en sorte que la tension aux bornes communes et le courant échangé aient les valeurs normales. Avec des excitations en série ou composées, il est plus prudent d'aimanter les inducteurs par une source électrique indépendante, afin de se mettre à l'abri des renversements de pôles pouvant résulter de fausses manœuvres.

Pour que la moyenne des puissances mécaniques des deux dynamos représente la puissance normale de celles-ci, il faut nécessairement que la génératrice fonctionne au delà et le moteur en deçà de cette charge. Le premier appareil absorbe alors une puissance égale à la puissance normale augmentée de ses pertes intérieures, tandis que le second restitue la puissance normale diminuée des pertes intérieures qui lui sont propres. Avec des machines assez fortes pour que leurs déchets soient inférieurs à 10 pour 100 de la puissance de régime, la surcharge imposée à la génératrice n'offre pas d'inconvé-

nients et, dans les circonstances ci-dessus, le rendement des dynamos ne diffère pas pratiquement du rendement en charge normale, la courbe du rendement accusant, en général, peu de variation au voisinage de cette dernière.

La puissance p, mesurée à l'aide du dynamomètre de transmission ou de l'électromoteur taré, figure les pertes mécaniques, électriques et magnétiques totales des deux machines. La part qui revient à chacune d'elles est sensiblement $p/2$. Par suite, en appelant P la puissance électrique relevée aux bornes communes, le rendement de la génératrice a pour expression

$$\eta_1 = \frac{P}{P + \frac{p}{2}}.$$

On peut essayer ainsi de grandes dynamos avec une puissance motrice restreinte, attendu qu'il n'y a guère à fournir qu'un cinquième de la puissance de régime d'une des machines.

Le procédé décrit, de même que quelques-uns des suivants, se prête à l'étude de la perte dans les transmissions par courroie. On commence par accoupler directement les dynamos; puis on les réunit par l'intermédiaire d'une courroie. La différence des puissances p mesurées dans les deux cas est le résultat cherché.

Méthode de MM. Fontaine et Cardew.

En vue de supprimer tout moteur auxiliaire, quand on dispose d'une source électrique suffisante, on peut raccorder à celle-ci, comme l'ont indiqué séparément M. Fontaine et M. Cardew, l'une des deux dynamos identiques à essayer, dont les arbres sont solidarisés comme dans la méthode de MM. Hopkinson, tandis que l'autre est reliée à un rhéostat. De cette manière, la première machine, tournant comme moteur, entraîne la seconde, qui fait office de génératrice.

Le rapport entre les watts aux bornes de la génératrice et les watts aux bornes du moteur est approximativement égal au carré du rendement de chacun de ces appareils. Si l'on se sert du même voltmètre et du même ampèremètre pour effectuer les mesures, le résultat ne dépend pas de l'exacti-

tude de l'étalonnage de ces instruments, dont il suffit que les indications soient proportionnelles. Une erreur due aux instruments électriques est d'ailleurs atténuée par cette circonstance que la valeur cherchée dépend de la racine carrée des lectures.

Il convient de faire fonctionner les deux machines à des régimes de courant aussi voisins que possible de l'intensité de service, la tension appliquée au moteur dépassant le voltage nominal d'une quantité à peu près égale à l'excès de celui-ci sur la différence de potentiel fournie par la génératrice.

Ce procédé élimine toute difficulté en ce qui concerne le mode d'excitation, qui peut être différent dans les deux machines étudiées. De plus, il permet d'accoupler des dynamos construites pour des voltages inégaux, pourvu que leurs puissances et leurs pertes intérieures soient sensiblement les mêmes. Il est fréquemment appliqué aux moteurs de tramway, dont on estime ordinairement le rendement en comprenant dans les pertes intérieures les frottements des engrenages. On réunit deux machines par l'intermédiaire d'un faux essieu portant une roue dentée, de part et d'autre de laquelle engrènent les pignons d'attaque.

Dans un essai de durée, il est avantageux d'utiliser le courant débité, en l'envoyant dans une distribution. Si l'excitation de la génératrice est insuffisante pour arriver au voltage requis, il suffit de mettre un survolteur en série avec cette machine.

Méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp.

La méthode dont il vient d'être question a l'inconvénient d'exiger une source électrique auxiliaire capable de développer une puissance supérieure à celle de chacune des dynamos essayées. Si l'on employait le courant produit par la génératrice pour aider la source auxiliaire, on pourrait réduire l'importance de cette dernière à la puissance perdue dans les deux machines accouplées et déterminer le rendement de grandes dynamos au moyen d'un groupe électrogène ou d'une batterie d'accumulateurs relativement faible.

C'est ce qu'ont fait Lord Rayleigh et M. Kapp.

Désignons par D_1 et D_2 les deux machines identiques à éprouver, mécaniquement reliées. Supposons les excitées en

dérivation et disposons leurs circuits électriques comme le montre la fig. 275, dans laquelle R_1 et R_2 désignent les rhéostats de champ magnétique, B un rhéostat de démarrage, C_1, C_2, C_3 et C_5 des clefs, A un ampèremètre et V un voltmètre.

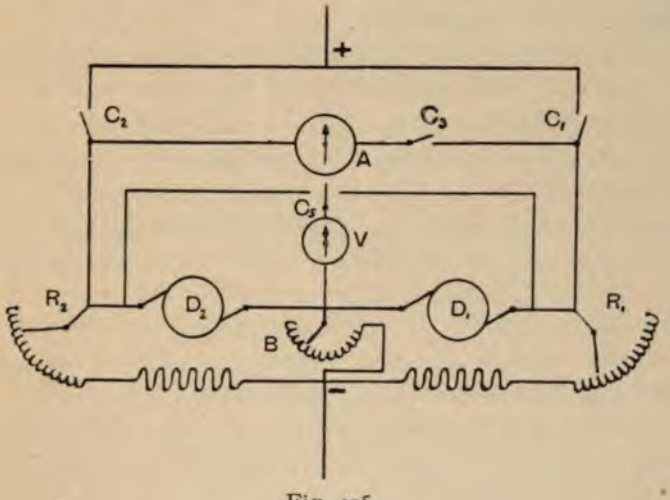


Fig. 275.

Soit D_1 la dynamo adoptée comme moteur, le choix étant indifférent puisque tout est symétrique. Après avoir fermé la clef C_1, on met D_1 en marche à l'aide du rhéostat de démarrage et on règle sa vitesse au moyen du rhéostat R_1. On excite ensuite la dynamo D_2 et on agit sur le rhéostat R_2 jusqu'à ce que D_2 présente sensiblement la même différence de potentiel aux bornes que D_1, ce qu'on vérifie au moyen du voltmètre. Lorsque ce résultat est atteint, l'induit D_2 n'est traversé que par un courant minime au moment où l'on ferme la clef C_3, qui réunit les deux dynamos en parallèle. Il convient que le voltmètre soit un appareil à aimant, pour être certain d'associer les machines par les pôles de mêmes noms, et on ne perdra pas de vue qu'un faible écart de tension suffit pour occasionner un courant dangereux dans le circuit peu résistant des armatures. On augmente graduellement l'excitation de D_2, jusqu'à ce que le courant I_2 débité par cette dynamo soit en deçà du courant

normal d'une quantité égale à l'excédent sur celui-ci du courant I_1 absorbé par le moteur. L'ampèremètre, qui renseigne le courant I_2 quand on laisse la clef C_2 ouverte, indique le courant I_1 lorsqu'on ouvre la clef C_1 après fermeture de la clef C_2. La différence $I_1 - I_2$ représente le courant emprunté par le moteur à la source auxiliaire.

L'emploi d'un même ampèremètre et d'un même voltmètre pour les deux machines réduit au minimum l'influence des erreurs de mesure.

On lit, à diverses reprises, les courants I_1 et I_2, en manœuvrant les clefs C_1 et C_2. On observe simultanément les voltages correspondants V_1 et V_2, en déplaçant la clef C_3. Ces tensions diffèrent légèrement entr'elles à cause de la résistance de la clef C_3, de l'ampèremètre et des fils de connexion.

Le rapport $V_2 I_2 / V_1 I_1$ vaut sensiblement le carré du rendement η_1 de chaque dynamo. Rigoureusement, il est égal au produit des rendements de la génératrice, du moteur et de la courroie d'accouplement, si un tel intermédiaire est utilisé, ce qui n'est pas désirable vu l'incertitude quant à son effet utile. Si les voltages V_1 et V_2 sont très peu différents, on peut écrire simplement

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}.$$

Avec les machines à excitation en série ou composée, la mise en parallèle amène aisément des renversements de pôles et des intensités de courant excessives. Déjà, dans le cas des dynamos en dérivation, il faut être très circonspect pour éviter de fausses manœuvres.

On préfère souvent laisser les circuits magnétisants en dehors des connexions principales et traiter les dynamos comme des machines à excitation indépendante, quels que soient les modes d'enroulement des inducteurs. Il est toujours possible d'estimer la dépense par effet Joule dans ceux-ci, en mesurant leurs résistances à chaud, ainsi que les courants qui les traversent ou les différences de potentiel qui y sont appliquées. Cette disposition a au surplus l'avantage de ne pas

faire entrer en ligne de compte, comme plus haut, l'énergie consommée dans les rhéostats de champ.

Si i_1 et i_2 sont les courants dans les induits des machines associées, on a alors, pour l'expression du rendement, en appelant W_1 et W_2 les pertes par effet Joule dans les inducteurs,

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{V_2\, i_2 - W_2}{V_1\, i_1 + W_1}}.$$

D'un tel essai, on peut déduire la somme des déchets F par frottements, H par hystérésis et C par courants de Foucault de chacune des dynamos, en lui supposant la même valeur dans les deux machines. Soit r_a la résistance de chaque armature à chaud :

$$F + H + C = \frac{I}{2}(V_1\, i_1 - V_2\, i_2) - \frac{I}{2} r_a (i_1^2 + i_2^2).$$

La méthode peut être étendue à des machines couplées en parallèle avec des excitations égales, à la condition de mettre à la suite de l'une d'elles quelques couples secondaires en opposition avec sa force électromotrice. Cette variante convient aux machines à inducteur unique et à deux armatures, telles que certaines dynamos actionnées par des turbines de Laval.

Dans les combinaisons ci-dessus, la source électrique auxiliaire doit fournir la différence de potentiel normale des dynamos essayées. Si celles-ci sont construites pour un voltage très élevé, il est loisible, au lieu de les relier en parallèle par rapport à la source auxiliaire, de les mettre en série avec cette dernière, en ayant soin d'exciter les inducteurs indépendamment, pour éviter tout accident, et d'opposer les forces électromotrices des armatures. La source auxiliaire doit alors débiter un courant égal au courant de service de chacun des induits et suppléer à la différence entre la tension V_1 nécessaire au moteur et la tension V_2 fournie par la génératrice. Abstraction faite de l'excitation, le rendement vaut alors

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}.$$

Tous les procédés d'essai par dynamos couplées avec récupération sont très avantageux pour les expériences de durée, parce qu'ils n'occasionnent pas de dépenses considérables d'énergie.

Détermination du rendement par évaluation des pertes. — *Méthode de M. Swinburne.*

M. Swinburne a suggéré une méthode d'essai très commode pour la recherche du rendement d'une dynamo sous diverses charges et n'exigeant qu'une source d'électricité auxiliaire suffisante pour faire fonctionner la machine à vide.

Ce procédé implique l'hypothèse de la constance des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault d'un moteur électrique avec et sans charge, pour un flux magnétique à travers l'induit et une vitesse de rotation déterminés, ainsi que celle de l'égalité des rendements d'une dynamo comme moteur et comme génératrice.

Considérons, par exemple, une génératrice en série construite pour donner, à la vitesse de N tours par unité de temps, une différence de potentiel aux bornes V et un courant i. Dans ces conditions, le rendement de la machine a pour expression

$$\eta_1 = \frac{V i}{V i + (r_a + r_s) i^2 + a},$$

r_a, r_s et a représentant respectivement la résistance de l'induit, celle de l'inducteur et les déchets F + H + C par frottements, hystérésis et courants de Foucault, et la force électromotrice que la dynamo développe est

$$E = V + i (r_a + r_s).$$

Pour estimer a, excitons l'inducteur séparément de telle manière que la dynamo, tournant comme moteur à vide, acquière la vitesse N en produisant la force électromotrice E. Soit i' le courant très faible que l'induit absorbe alors sous une différence de potentiel

$$V' = E + i' r_a,$$

dont le second terme est généralement négligeable devant le

premier. Le flux magnétique à travers l'induit est ainsi le même que dans le fonctionnement comme génératrice en charge, car on a, dans les deux cas,

$$\mathcal{N} = \frac{E}{n N p / c},$$

n étant le nombre de conducteurs actifs à la périphérie de l'induit offrant $2c$ circuits dérivés et $2p$ le nombre de pôles de l'inducteur.

A égalité de vitesse et de flux dans l'armature, les frottements augmentent très peu avec la charge, sauf en cas d'attaque par courroie ; la perte par hystérésis est légèrement plus élevée en charge qu'à vide, par suite de la déformation du flux, qui accroît localement l'induction magnétique et sursature les dents du noyau en certaines régions ; cette déformation accentue aussi quelque peu les courants de Foucault en rendant les variations de flux plus brusques, spécialement vers les cornes polaires ; les supports de fixation, surtout dans les anneaux, sont également le siège de courants induits plus intenses en charge qu'à vide ; enfin, les extra-courants sous les balais occasionnent un déchet croissant avec la charge. Pour ces diverses raisons, abstraction faite de l'effet Joule, les pertes totales sont ordinairement plus faibles de 1 à 2 pour 100 de la puissance nominale à vide qu'en régime normal. Cependant, pour une première approximation, il est admissible de négliger la différence et de poser que les déchets en question sont mesurés par

$$a = E i',$$

de sorte qu'on peut calculer le rendement cherché par la formule

$$\eta = \frac{V i}{V i + (r_a + r_s) i^2 + E i'}.$$

S'il s'agissait d'une génératrice en dérivation, dont l'inducteur, de résistance r_d, est traversé en charge par un courant i_d, il viendrait

$$\eta = \frac{V i}{V i + r_a (i + i_d)^2 + r_d i_d^2 + E i'}.$$

Pour un électromoteur, en désignant par V et i la tension et le courant d'alimentation en charge, on aurait, dans l'éventualité d'une excitation dérivée par exemple,

$$\eta_1 = \frac{Vi - r_a (i - i_d)^2 - r_d i_d^2 - Ei'}{Vi}.$$

Il est important de faire intervenir dans la résistance de l'induit les contacts entre les balais et le collecteur. Les résistances de l'armature et de l'inducteur doivent être prises, avec les précautions indiquées antérieurement, à la température de charge ou ramenées à celle-ci. Pour donner à vide aux frottements leur valeur normale, il est nécessaire de laisser tourner la machine pendant un certain temps, afin que l'huile des paliers prenne sa température de service. Il faut aussi veiller à ce que les balais aient leur serrage usuel.

On remarquera que la méthode exposée est analogue à celle qui consiste à évaluer le rendement d'une machine à vapeur par la mesure de la puissance indiquée quand la machine tourne à vide. Elle est applicable, non seulement à la pleine charge, mais à toutes les charges.

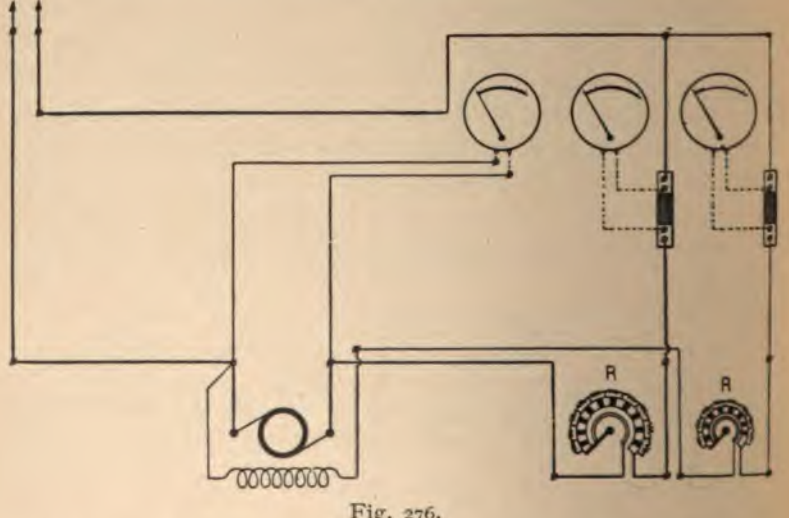


Fig. 276.

La fig. 276 montre les connexions à réaliser pour la marche

à vide comme moteur. Il est à conseiller de faire usage d'une batterie d'accumulateurs comme source auxiliaire, afin d'obtenir un courant d'essai bien constant, à moins qu'on ne dispose d'une génératrice électrique conduite par un moteur très régulier, et encore, dans ce dernier cas, une certaine circonspection est nécessaire. C'est ainsi qu'on évitera d'alimenter une dynamo en dérivation puissante par une petite génératrice en série, de crainte que les variations de vitesse n'amènent un renversement de polarité magnétique dans celle-ci.

A part l'erreur systématique provenant de l'inconstance des pertes signalée plus haut et dont l'ordre n'excède pas l'incertitude que comporte la détermination directe du rendement d'après les diagrammes d'indicateur, la méthode de M. Swinburne, qui est la plus usitée à cause de sa simplicité, admet une grande précision, parce que les mesures portent uniquement sur la puissance perdue dans la dynamo, c'est-à-dire sur la différence entre la puissance reçue et la puissance restituée. Si l'excès représente 10 pour 100 de cette dernière, par exemple, et peut être estimé à 2 pour 100 près, à l'aide du voltmètre et de l'ampèremètre, la valeur trouvée pour le rendement est exacte à 0,2 pour 100 environ.

Un léger écart autour de la vitesse N dans la marche comme moteur à vide a très peu d'influence sur le courant i' observé, car

$$i' = \frac{V' - E}{r_a}$$

et la force contre-électromotrice E varie sensiblement comme la différence de potentiel V' avec la vitesse. Un déréglage de vitesse de 4 à 5 pour 100 ne modifie pratiquement pas l'intensité i'.

Il est toujours bon de vérifier si la machine examinée est capable de fonctionner, sans échauffement exagéré et étincelles de commutation excessives, avec les constantes V, i et N indiquées par le constructeur.

Comparaison numérique avec la méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp.

Tandis que la méthode de M. Swinburne conduit à des

rendements trop forts, celle de Lord Rayleigh et de M. Kapp donne des valeurs plutôt trop faibles, attendu que les deux dynamos couplées travaillent l'une au-dessus et l'autre en dessous de la puissance normale.

Voici, à titre d'exemple, les résultats relevés sur deux électromoteurs en dérivation D_1 et D_2, de construction identique et destinés à développer une puissance mécanique voisine de 10 chevaux, au régime de 114 volts, 75 ampères et 900 tours par minute.

Les appareils de mesure utilisés étaient un voltmètre Weston pour lire les tensions et un millivoltmètre Weston, dérivé sur un shunt, pour noter les intensités. Ces instruments avaient été étalonnés au préalable. Les calculs numériques ont été effectués à la règle de 52 cm.

Les machines, accouplées élastiquement par l'intermédiaire d'un ressort à boudin et associées électriquement suivant la disposition de la fig. 275, mais avec des excitations indépendantes, ont été maintenues en charge pendant 2,5 heures, pour échauffer les circuits et les lubrifiants. Après cette durée, une série de lectures a donné les moyennes ci-dessous :

Moteur $D_1 : i_1 = 86{,}2$ ampères; $V_1 = 113{,}97$ volts; $i_1 V_1 = 9825$ watts.

Moteur $D_2 : i_2 = 66{,}5$ ampères; $V_2 = 115{,}98$ volts; $i_2 V_2 = 7717$ watts.

Nombre de révolutions : 1121 par minute.

D'après ces chiffres,

$$F + H + C = \frac{1}{2}(9825 - 7717) - \frac{1}{2} r_a (\overline{86{,}2}^2 + \overline{66{,}5}^2).$$

Pour déterminer la résistance r_a, on a fait passer dans les armatures, au moment de l'arrêt, un courant estimé au moyen du millivoltmètre shunté, la différence de potentiel aux balais étant évaluée par un voltmètre Weston marquant de 0 à 3 volts. La moyenne de trois expériences a été 0,061 ohm. Les inducteurs, mesurés suivant le même procédé, ont accusé, d'autre part, 32,95 ohms.

De ce qui précède, il résulte que $F + H + C = 692{,}5$ watts à 1121 tours par minute, avec un courant moyen dans l'induit

de 76,4 ampères et une force électromotrice moyenne de 114,3 volts, calculée par la formule

$$\frac{V_1 - i_1 r_a + V_2 + i_2 r_a}{2}.$$

L'essai à vide de M. Swinburne, appliqué ensuite au moteur D_1, a conduit aux chiffres suivants, qui font ressortir le peu d'influence d'un écart de vitesse :

Volts aux bornes.	Ampères dans l'induit.	Tours par minute.
114,2	5,3	1 116
114,2	5,3	1 117
114,2	5,3	1 154

L'effet Joule dû au courant de 5,3 ampères pouvant être négligé, on trouve ainsi, pour F + H + C, dans les conditions de vitesse et de force électromotrice moyenne du fonctionnement précédent en charge, 606 watts.

Le rapport des pertes F + H + C déduites des deux méthodes est donc

$$\frac{[F + H + C]_{\text{Kapp}}}{[F + H + C]_{\text{Swinburne}}} = \frac{692,5}{606} = 1,142.$$

Connaissant ce rapport, il suffit du procédé de M. Swinburne pour obtenir, d'une manière très approchée, la valeur réelle du rendement de toute dynamo semblable à celles ci-dessus, au régime nominal renseigné par le constructeur.

Considérons, par exemple, le moteur D_1. Avec un courant d'alimentation de 75 ampères sous 114 volts, l'intensité dans l'induit vaut 75 — 114/32,95 = 71,53 ampères, la chute de tension ohmique dans l'armature atteint 71,53 × 0,061 = 4,36 volts et la force contre-électromotrice mesure 114 — 4,36 = 109,64 volts. En cherchant à se rapprocher de cette dernière valeur, ainsi que de la vitesse de 900 tours par minute, dans un essai Swinburne, on a observé simultanément $V' = 109$ volts, $i' = 4,89$ ampères et $N = 895$ révolutions par minute. Il vient, par suite, dans les conditions normales de service :

Puissance électrique absorbée.	8 550 watts.
Effet Joule dans l'induit	311 id.
Effet Joule dans l'inducteur	395 id.
$[F + H + C]_{\text{Swinburne}}$	537 id.
$[F + H + C]_{\text{Kapp}}$ . . . . . $537 \times 1{,}142 = 613$	id.
Rendement Swinburne . . . . $(8\,550 - 1\,243)/8\,550 = 0{,}855$	
Rendement Kapp . . . . . $(8\,550 - 1\,319)/8\,550 = 0{,}848$	
Rendement moyen, à adopter	0,8515

Discussion.

Puisque $i_d = V/r_d$ et que, dans la marche à vide, V' diffère très peu de E, l'expression servant au calcul du rendement d'un électromoteur en dérivation, d'après la méthode de M. Swinburne, peut s'écrire sous la forme

$$\eta_1 = \frac{Vi - r_a\left(i - \frac{V}{r_d}\right)^2 - \frac{V^2}{r_d} - V'i'}{Vi},$$

où V et i sont des quantités données.

Soient dr_a et dr_d les erreurs que comportent les déterminations expérimentales des résistances r_a et r_d. Supposons, d'autre part, qu'au lieu de réaliser exactement, à vide, la vitesse normale N et la différence de potentiel V' correspondant à la même force électromotrice qu'en charge, on opère à N + dN tours par unité de temps et on ait aux bornes de la dynamo une tension V' + dV', dN et dV' comprenant les erreurs d'observation. Appelons enfin di' l'erreur commise dans la lecture du courant i'.

En admettant qu'entre les limites restreintes d'expérience les pertes mesurées par le produit $V'i'$ sont proportionnelles à la vitesse de rotation, les erreurs partielles du résultat sont:

$$e_{r_a} = \frac{d\eta_1}{dr_a}dr_a = \left(-\frac{i}{V} + \frac{2}{r_d} - \frac{V}{i\,r_d^2}\right)dr_a,$$

$$e_{r_d} = \frac{d\eta_1}{dr_d}dr_d = \frac{1}{r_d^2}\left(-2r_a + \frac{2r_aV}{i\,r_d} + \frac{V}{i}\right)dr_d,$$

$$e_{i'} = \frac{d\eta_1}{di'}di' = -\frac{V'}{Vi}di',$$

$$e_{V'} = \frac{d\eta_1}{dV'}dV' = -\frac{i'}{Vi}dV',$$

$$e_N = \frac{d\eta_1}{dN}\,dN = -\frac{1}{Vi}\,\frac{d(V'i')}{dN}\,dN = -\frac{V'i'}{Vi}\,\frac{d(V'i')}{V'i'} = -\frac{V'i'}{Vi}\,\frac{dN}{N}.$$

Dans le cas particulier où V = 114 volts, i = 75 ampères, N = 900 tours par minute, r_a = 0,061 ohm, r_d = 32,95 ohms, V' = 109 volts et i' = 4,89 ampères, les formules ci-dessus deviennent

$$e_{r_a} = -\,0{,}598\,7\,dr_a,$$

$$e_{r_d} = 0{,}001\,29\,dr_d,$$

$$e_{i'} = -\,0{,}012\,76\,di',$$

$$e_{V'} = -\,0{,}000\,572\,3\,dV',$$

$$e_N = -\,0{,}062\,4\,\frac{dN}{N}.$$

Supposons qu'on désire, dans ces conditions, que l'erreur probable du résultat,

$$E_p = \sqrt{e_{r_a}^2 + e_{r_d}^2 + e_{i'}^2 + e_{V'}^2 + e_N^2},$$

vaille 0,005 η_1 et que toutes les erreurs partielles aient la même importance

$$e = \frac{E_p}{\sqrt{5}} = \frac{0{,}005}{\sqrt{5}}\,\eta_1,$$

soit, avec η_1 = 0,855,

$$e = 0{,}001\,911.$$

En égalant e_{r_a}, e_{r_d}, $e_{i'}$, $e_{V'}$ et e_N à cette dernière valeur, on trouve qu'il faut alors que

$$\frac{dr_a}{r_a} = 0{,}052\,3,$$

$$\frac{dr_d}{r_d} = 0{,}045\,0,$$

$$\frac{di'}{i'} = 0{,}030\,7,$$

$$\frac{dV'}{V'} = 0{,}030\,7,$$

$$\frac{dN}{N} = 0{,}030\,7.$$

Ce qui précède montre qu'il n'est pas indispensable de mesurer les résistances électriques exactement à la température de service de la dynamo examinée. Les erreurs de 5,23 et 4,5 pour 100 permises autorisent un écart de température de plus de 10° C, le coefficient de variation du cuivre étant 0,004. Dans la méthode de M. Swinburne, comme dans beaucoup de procédés industriels, la cause d'inexactitude la plus sérieuse est une erreur systématique de principe, consistant principalement ici à admettre que les pertes dans le fer et les déchets par courants de Foucault dans le cuivre sont les mêmes à vide et en charge.

Méthode par essais à circuit ouvert et en court-circuit.

Pour déterminer le rendement d'une dynamo en évaluant les pertes, on fait habituellement fonctionner la machine comme réceptrice sans charge, ainsi qu'on vient de le voir plus haut. Mais, si l'on dispose d'un électromoteur taré, on peut l'utiliser pour entraîner la dynamo comme génératrice à vide, en se servant de préférence d'un accouplement élastique direct, afin d'éviter l'incertitude au sujet de l'effet utile des courroies de transmission. Dans ces conditions, si la dynamo tourne à sa vitesse de régime, avec une excitation indépendante développant la force électromotrice induite de pleine charge, la puissance mécanique qu'elle absorbe vaut approximativement les pertes normales par hystérésis, courants de Foucault et frottements.

Le restant des pertes dont l'armature de la dynamo est le siège en service peut se trouver d'une manière semblable, par une expérience complémentaire. A cette fin, on met la dynamo, actionnée par le moteur taré, en court-circuit sur un ampèremètre de résistance négligeable, avec les balais calés à la ligne neutre géométrique, et on règle son excitation séparée jusqu'à obtenir, à la vitesse de régime, l'intensité du courant de pleine charge dans l'induit. La puissance motrice qui lui est alors fournie représente l'effet Joule normal $r_a i_a^2$ de l'armature, la perte F par frottements, un déchet minime $H' + C'$ par hystérésis et courants de Foucault dû à la faible excitation, ainsi que le supplément $H'' + C''$ de pertes par hystérésis, courants de Foucault et extra-courants sous les balais qu'occasionne le

courant de l'induit. En rompant le court-circuit, on estime ensuite $F + H' + C'$, pour calculer, par différence, la somme $r_a i_a^2 + H'' + C''$, à ajouter à l'effet Joule normal dans l'inducteur et aux pertes mesurées dans la première marche à circuit ouvert pour avoir pratiquement toutes les pertes en charge de la dynamo étudiée.

Séparation des pertes par frottements, par hystérésis et par courants de Foucault. — *Méthode de M. Mordey.*

Il est utile de connaître séparément les pertes par frottements, par hystérésis et par courants de Foucault de l'induit d'une dynamo.

L'effet dissipateur des courants de Foucault croît sensiblement comme le carré de la vitesse, car il est proportionnel au carré de la force électromotrice d'induction qui leur donne naissance et en raison inverse de la résistance électrique qu'ils rencontrent, laquelle ne change pas beaucoup si l'armature n'atteint pas une température exagérée. La chaleur due à l'hystérésis est proportionnelle à la simple vitesse. Quant au déchet par frottements, il varie suivant une puissance de la vitesse comprise entre la première et la seconde.

S'appuyant sur les propriétés ci-dessus, M. Mordey a indiqué une méthode industrielle propre à déterminer l'importance individuelle de chacune de ces pertes. Il commence par mesurer, à l'aide d'un dynamomètre de transmission ou mieux d'un électromoteur taré, la puissance consommée par les frottements de la dynamo tournant, sans excitation, à différentes vitesses. Il relève ensuite la puissance absorbée lorsque la machine marche aux mêmes vitesses, à vide et avec l'inducteur excité indépendamment de manière à produire le flux magnétique normal à travers l'induit. Par différence, on obtient ainsi la puissance dissipée, à chaque vitesse, par l'ensemble de l'hystérésis et des courants de Foucault. Soient P et P' ses valeurs pour deux vitesses N et N'. En désignant par k et k' les coefficients de proportionnalité à multiplier respectivement par la vitesse et par le carré de celle-ci pour avoir la puissance hystérétique et la puissance correspondant aux courants parasites, on peut poser

$$P = k N + k' N^2,$$
$$P' = k N' + k' N'^2;$$

d'où l'on tire

$$k = \frac{P' N^2 - P N'^2}{N' N^2 - N N'^2},$$
$$k' = \frac{P' N - P N'}{N N'^2 - N' N^2}.$$

Les courants de Foucault intervenant dans l'essai décrit sont ceux du noyau en fer, des pièces de consolidation et de l'enroulement de l'induit. En vue d'estimer l'influence particulière des derniers, on pourrait faire tourner, entre les pôles excités, d'abord le noyau non bobiné et plus tard l'armature pourvue de ses spires.

Méthodes de MM. Hummel, Dettmar et Housman.

La séparation expérimentale des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault d'un induit est aussi possible sans l'assistance d'un moteur auxiliaire.

Pour isoler le déchet par frottements dans les paliers, aux balais et contre l'air, M. Hummel fait tourner la dynamo étudiée comme électromoteur à vide, en réduisant simultanément la tension aux bornes et l'excitation, de manière à maintenir la vitesse invariable à la valeur voulue. Dans ces conditions, l'hystérésis et les courants de Foucault décroissent progressivement, mais les frottements restent sensiblement constants. Si l'on porte en ordonnées les puissances électriques absorbées par l'induit, déduction faite de l'effet Joule, et en abscisses les forces contre-électromotrices développées par l'armature, on obtient une courbe, dont l'extrapolation jusqu'à l'axe des ordonnées délimite, sur ce dernier, une longueur qui représente la perte de puissance due aux frottements.

Il n'est pas aisé, dans l'expérience ci-dessus, de régler l'excitation de façon à ramener toujours la même vitesse et l'on doit fréquemment interpoler pour trouver les points de la courbe cherchée. On évite ces tâtonnements en procédant comme suit, d'après l'indication de M. Dettmar. On relève, pour diverses excitations constantes, les courants i pris par l'induit, de résistance r_a, en tournant à vide avec des diffé-

rences de potentiel v décroissantes aux balais et l'on note simultanément les vitesses N. On calcule les forces contre-électromotrices $e = v - ir_a$, ainsi que les puissances $P = ei$, et l'on trace, pour chaque excitation, les diagrammes $P = f(e)$ et $N = f'(e)$. On obtient ainsi des couples de lignes tels que 1 et 1', 2 et 2', 3 et 3', fig. 277. Pour une vitesse OA donnée, la perte par frottements est alors déterminée par l'ordonnée OA' à l'origine de la courbe construite en joignant les points B', C', D' des lignes de puissance définis par les abscisses OB, OC, OD

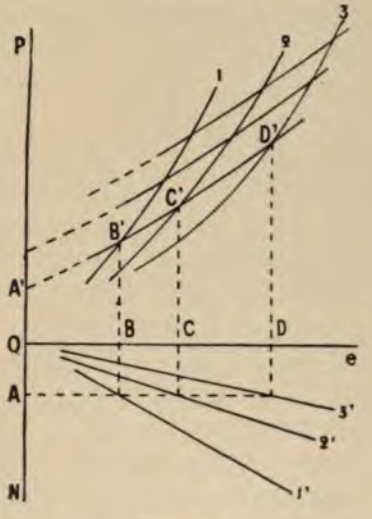


Fig. 277.

des points qui, sur les lignes de vitesse de même numéro d'ordre, correspondent à l'ordonnée OA. En dressant plusieurs courbes telles que A' B' C' D', relatives à différentes vitesses, on peut réunir les éléments d'un diagramme montrant comment la perte par frottements varie avec la vitesse.

Si des puissances $P = ei$ se rapportant à une même excitation on déduit les frottements, il reste les déchets par hystérésis et par courants de Foucault, dont la somme H + C peut être représentée par le binôme $kN + k'N^2$, contenant, pour l'hystérésis, un terme proportionnel à la vitesse et, pour les

courants parasites, un terme proportionnel au carré de celle-ci. Par suite, si l'on trace la courbe

$$\frac{H + C}{N} = k + k'N,$$

en portant en ordonnées les pertes H + C divisées par les vitesses respectives et en abscisses ces dernières, il vient une droite AS, fig. 278, dont l'ordonnée à l'origine est égale au facteur k et le coefficient angulaire au facteur k'. Avec l'excitation considérée, pour une certaine vitesse OB, H est donc mesuré par la surface rectangulaire OADB et C par l'aire rectangulaire ARSD.

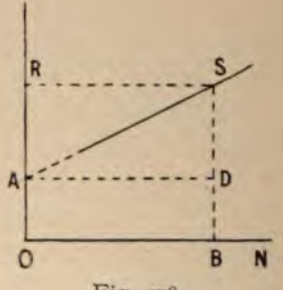


Fig. 278.

Au lieu de la droite précédente, on dresse souvent le diagramme de M. Housman, en adoptant, comme abscisses, les forces contre-électromotrices e correspondant aux différences de potentiel appliquées à l'induit pour varier sa vitesse à vide sous excitation constante et, comme ordonnées, les courants i d'armature. Cette ligne diffère légèrement d'une droite, attendu que les produits ei comprennent les frottements, proportionnels à une puissance de la vitesse intermédiaire entre la première et la seconde. Rigoureusement, elle ne se prête par conséquent pas à la séparation des pertes. Toutefois, en admettant, par approximation que les frottements dans les paliers et sur le collecteur croissent comme la simple vitesse, à la façon de l'hystérésis, tandis que le déchet par ventilation dépend du carré de la vitesse, de même que les courants de Foucault, on

peut s'en servir pratiquement pour scinder les pertes en deux groupes, où l'importance relative des éléments constituants reste indéterminée.

Méthode de ralentissement.

Les pertes par frottements, par hystérésis et par courants de Foucault d'un induit peuvent s'estimer au besoin par de simples mesures de vitesse.

Pour obtenir les frottements, on lance la dynamo, comme électromoteur à vide ou mécaniquement à l'aide d'un moteur auxiliaire avec débrayage, à une vitesse supérieure à la valeur normale, puis on laisse revenir la machine spontanément au repos, après l'avoir éventuellement désexcitée, et on observe les vitesses décroissantes, soit avec un tachymètre dont la résistance de frottement est négligeable, soit avec un compte-tours dont on lit l'indication à des intervalles suffisamment rapprochés, soit en notant la force électromotrice induite dans l'armature sous l'influence du magnétisme rémanent de l'inducteur. Dans ce dernier cas, il faut déterminer, au préalable, la tension correspondant à une vitesse connue et veiller à ce que l'aimantation ne varie pas pendant les essais, en ne perdant pas de vue que le flux d'une dynamo ne suit que lentement les changements du courant magnétisant. On dresse une courbe, dont les temps en secondes figurent les abscisses et les nombres de révolutions par seconde les ordonnées.

Si Ω est le moment d'inertie de l'armature, ω la vitesse angulaire et N le nombre de tours par unité de temps à un instant donné de la période de ralentissement, la force vive vaut, à ce moment,

$$W = \frac{1}{2}\Omega\omega^2 = 2\pi^2\Omega N^2$$

et, comme l'induit tourne sans recevoir d'énergie extérieure, ses frottements absorbent alors une puissance

$$P = -\frac{dW}{dt} = -4\pi^2\Omega N\frac{dN}{dt}.$$

La valeur dN/dt est donnée par le coefficient angulaire de

la tangente menée à la courbe $N = f(t)$ au point correspondant à la vitesse considérée.

Comme le moment d'inertie Ω est généralement inconnu, M. Routin a proposé de l'éliminer en répétant l'expérience de ralentissement, après avoir appliqué sur la poulie de la machine un frein à corde développant un couple résistant supplémentaire. Si, pour la même vitesse N, on relève la valeur $dN/dt = \operatorname{tang}\alpha$ sur la première courbe et la valeur $dN/dt = \operatorname{tang}\alpha'$ sur la seconde, on a, en appelant p la puissance consommée par le frein,

$$P = -4\pi^2\,\Omega\,N\operatorname{tang}\alpha,$$
$$P + p = -4\pi^2\,\Omega\,N\operatorname{tang}\alpha';$$

d'où l'on tire

$$P = p\,\frac{\operatorname{tang}\alpha}{\operatorname{tang}\alpha' - \operatorname{tang}\alpha}.$$

Il est bon de charger le frein de manière que $\operatorname{tang}\alpha'$ soit approximativement égal à $2\operatorname{tang}\alpha$. Pratiquement, le frein doit pouvoir absorber environ 5 pour 100 de la puissance nominale de la dynamo.

Les mêmes essais, pratiqués sur la machine excitée de façon à produire à vide la force électromotrice normale avec la vitesse de service, c'est-à-dire de manière à donner au flux à travers l'induit sa valeur de pleine charge, font connaître la puissance dissipée, à ce dernier régime, par les frottements, l'hystérésis et les courants de Foucault, sous réserve des restrictions faites, à propos de la méthode de M. Swinburne, au sujet des erreurs résultant des distorsions de flux et de l'accroissement des frottements avec la charge.

Les mesures de ralentissement ne réussissent que si la durée de la période variable avant l'arrêt dépasse une trentaine de secondes, ce qui n'est pas toujours le cas, avec excitation, pour les dynamos d'une puissance inférieure à 5 kilowatts.

Les courbes $N = f(t)$ sont sensiblement rectilignes aux environs de la vitesse normale, ce qui permet d'obtenir la direction de la tangente correspondante avec beaucoup d'exactitude.

L'emploi d'un frein pour l'élimination du moment d'inertie

inconnu est assez incommode, à cause de l'instabilité d'un tel appareil quand la vitesse est variable. Aussi préfère-t-on souvent opérer comme suit. Soit *a*, fig. 279, la courbe de ralen-

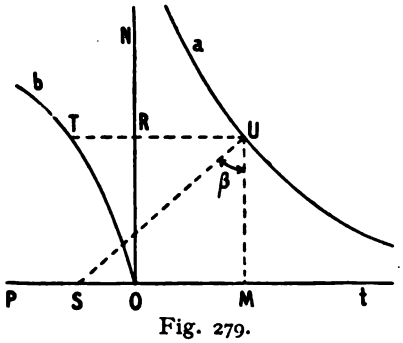


Fig. 279.

tissement de la dynamo étudiée pour une certaine excitation. Il est aisé de voir que, pour un point quelconque U,

$$-\frac{dN}{dt} = \text{tang}\,\beta$$

et

$$-N\frac{dN}{dt} = SM,$$

SM étant la sous-normale de ce point. Pour déterminer le moment d'inertie

$$\Omega = \frac{P}{-4\pi^2 N\frac{dN}{dt}} = \frac{P}{4\pi^2 SM},$$

il suffit donc de connaître les pertes P par frottements, hystérésis et courants de Foucault correspondant à la vitesse N = UM. Dans ce but, avec l'excitation considérée, mesurons, en même temps que les vitesses, les puissances électriques vi absorbées par l'induit, de résistance r_a, tournant comme moteu. à vide sous diverses tensions v et traçons la courbe *b* dont les abscisses sont les différences $vi - i^2 r_a = P$ et les ordonnées les vitesses. On a

$$\Omega = \frac{RT}{4\pi^2 SM}.$$

Le moment d'inertie étant déterminé, on peut déduire de la courbe de ralentissement sans excitation la perte par frottements, égale, pour chaque vitesse, au produit de $4\pi^2\Omega$ par la sous-normale correspondante. On vérifiera ainsi que cette perte n'est pas proportionnelle à la simple vitesse, mais plutôt à la puissance 1,5 de celle-ci. Par différence entre les puissances accusées, pour une même vitesse, par une courbe de ralentissement avec excitation et la courbe sans excitation, on arrive aux déchets $H + C$ par hystérésis et par courants de Foucault, dont la séparation se fait aisément en traçant le diagramme $(H + C)/N = f(N)$ et en se rappelant que H croît comme la vitesse, tandis que C augmente comme le carré de cette dernière. En opérant avec diverses excitations, on appréciera l'influence de celles-ci sur les pertes H et C.

Sur les dynamos puissantes, la méthode de ralentissement permet encore l'essai de court-circuit de l'induit. A cet effet, après avoir lancé l'armature au moyen d'un moteur auxiliaire, on la met en court-circuit sur un ampèremètre, l'inducteur étant faiblement excité par une source indépendante, et, pendant la période de retardation, on observe la décroissance de la vitesse et du courant induit. Grâce à la constante d'inertie $4\pi^2\Omega$, on peut ainsi évaluer les pertes par effet Joule, courants de Foucault, hystérésis et frottements en court-circuit, et, en estimant ensuite les trois derniers déchets dans une nouvelle expérience pratiquée après ouverture du court-circuit, isoler approximativement, par soustraction, les pertes dues au courant de l'armature et à la commutation. Dans l'essai en question, on cale les balais à la ligne neutre géométrique.

Chapitre XXXII.

ALTERNATEURS ET MOTEURS SYNCHRONES.

Enregistrement des grandeurs électriques périodiques. Procédés de M. Joubert, de M. Hospitalier, de M. Duddell, de M. Blondel, de MM. Abraham et Carpentier, de M. Braun et de l'auteur. — Les observations générales faites au sujet des essais à exécuter avant et après la construction des dynamos à courant continu subsistent pour les alternateurs. A ces expériences s'ajoute, dans le cas présent, le tracé de la courbe ondulatoire de force électromotrice. Nous donnerons, à cette occasion, quelques détails sur l'enregistrement des courbes périodiques, qui trouve actuellement son application dans beaucoup de problèmes soulevés par les distributions à courants alternatifs.

1) Pour relever les points successifs de la courbe montrant les variations cycliques de la force électromotrice d'un alternateur, M. Joubert a indiqué le dispositif suivant, dans lequel le point relatif à une position déterminée du rotor par rapport au stator s'obtient en reliant un condensateur à l'induit au moment correspondant. L'axe mobile de la machine, sur lequel est ordinairement monté l'inducteur, porte une bague métallique *b* pourvue d'une languette affleurant sur une bague isolante accolée, fig. 280. Un frotteur *f*, appuyant sur la bague

conductrice, communique avec l'extrémité B d'un des enroulements de l'induit, dont l'autre extrémité A peut être raccordée, par une clef de charge et décharge k, à l'une des armatures du condensateur C. La seconde armature de ce dernier est en communication avec un frotteur f' touchant normalement la bague isolante et par instants la languette de métal. A ces moments, si la clef est abaissée, le condensateur se charge à la différence de potentiel instantanée de l'enroulement étudié. En le déchargeant dans un galvanomètre balistique G, on peut donc déterminer cette tension. Le déplacement du frotteur f' ou, ce qui revient au même, de l'ensemble des deux frotteurs

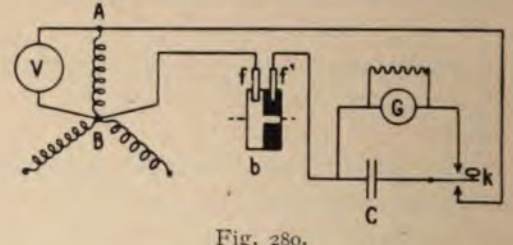


Fig. 280.

autour d'un cadran gradué permet de répéter la mesure pour diverses positions séparées par des intervalles angulaires représentant une fraction connue de la période de l'alternateur. Un voltmètre V dérivé sur l'enroulement sert à vérifier si la force électromotrice efficace reste constante pendant l'essai.

Si l'on substitue un électromètre au galvanomètre, il est possible de supprimer la clef k et de maintenir l'instrument en connexion permanente avec les deux armatures du condensateur, dont il renseigne directement la différence de potentiel.

On peut aussi estimer la tension instantanée par une méthode d'opposition. A cet effet, on relie les points entre lesquels elle se produit, par l'intermédiaire d'un galvanomètre et du contact tournant, à un rhéostat traversé par un courant continu. On règle la résistance comprise entre les points de raccordement au rhéostat jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. Si la résistance variable est un fil divisé, comme dans les potentio-

mètres, en appelant L la longueur totale du fil, V la différence de potentiel à ses extrémités et l la longueur de fil qui maintient le galvanomètre au zéro, on a, pour la force électromotrice cherchée,

$$v = \frac{l}{L} V.$$

Le montage de la fig. 281 évite également la clef de charge et décharge. Il utilise trois frotteurs solidaires f, f' et f'', dont le premier charge le condensateur au moment où il rencontre la languette métallique, tandis que le troisième, qui passe au

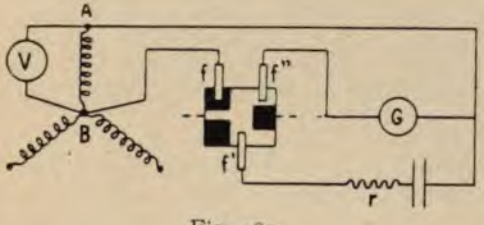


Fig. 281.

même instant sur une partie isolante, décharge immédiatement après le condensateur dans le galvanomètre. Sous l'influence des impulsions répétées, celui-ci prend une déviation permanente, qui définit la différence de potentiel inconnue, si l'on a soin de tarer au préalable l'instrument avec des couples étalons. r est une résistance mise à la suite du condensateur pour supprimer les étincelles au balai de charge.

Il arrive parfois, dans la méthode de M. Joubert et ses variantes, que des charges statiques, développées par le frottement de la courroie de transmission sur la poulie de la machine, communiquent au condensateur une quantité d'électricité parasite pouvant fausser les résultats. Il faut relier l'arbre de l'alternateur à la terre pour se mettre à l'abri de cette cause perturbatrice.

Les combinaisons considérées se prêtent au relevé, non seulement de la force électromotrice d'un alternateur à circuit ouvert, mais aussi de la différence de potentiel fournie par

la machine à un circuit extérieur ou existant aux extrémités d'une résistance quelconque intercalée dans celui-ci.

Elles peuvent être appliquées, pour trouver les variations d'une différence de potentiel périodique due à un alternateur inaccessible, en se servant d'un moteur synchrone pour faire tourner le contact mobile.

2) Si, dans le dispositif de la fig. 281, on déplace lentement les trois balais f, f' et f'', le galvanomètre accuse une déviation variable, qui permet d'enregistrer la courbe figurant la force électromotrice rapportée au temps sur un tambour dont le mouvement est solidaire de celui des balais.

M. Hospitalier est arrivé au même résultat, dans un appareil appelé *ondographe*, en laissant les balais fixes et en donnant au commutateur rotatif une vitesse angulaire légèrement inférieure à celle de l'alternateur ou plutôt d'un petit moteur synchrone qu'il actionne.

Cet arrangement est représenté en perspective et en plan dans les fig. 282 et 283. Le moteur synchrone A, dont l'induc-

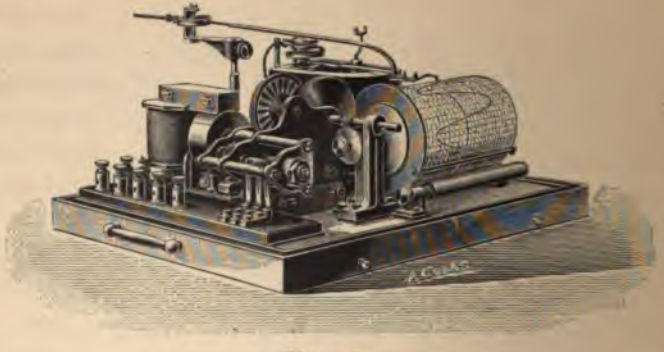


Fig. 282.

teur est formé d'un fer en croix, commande, par les trains d'engrenages B, d'une part, le tambour enregistreur C et, d'autre part, le commutateur D; le galvanomètre E actionne une aiguille F munie d'une plume traçant sur le tambour.

Par les bornes G et G', le moteur est soumis à une différence de potentiel provenant du générateur étudié. Les bornes H

et H′ sont raccordées à un condensateur de capacité convenable. Aux bornes I et I′ est appliquée la force électromotrice U à enregistrer.

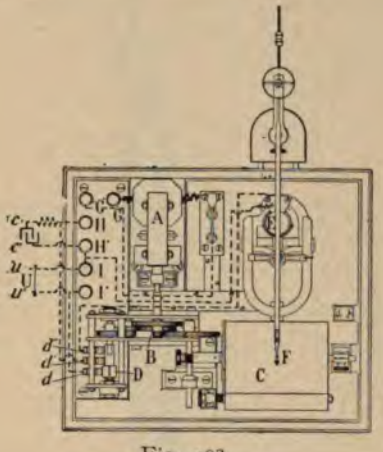


Fig. 283.

Une armature c' du condensateur communique constamment, par H′ et I, avec l'une des extrémités u de l'enroulement induit de l'alternateur; l'autre armature c est reliée, par le balai à contact continu d', à la masse du commutateur D. Quand le balai d, qui est raccordé par I′ avec l'autre extrémité u' de l'enroulement induit, est mis à la masse par le passage de la languette conductrice mince que présente le commutateur, le condensateur se charge et est porté à la différence de potentiel U correspondant au moment de la rupture. Pendant ce temps, sous le balais d'' passait une partie isolante du commutateur, mais, immédiatement après, d'' se trouve mis à la masse, tandis que d est isolé; il s'ensuit que le condensateur se décharge, par le circuit c H d' d'' E H′ c', à travers le galvanomètre.

Les rouages B sont combinés de façon que, lorsque le moteur synchrone fait 1000 tours, le commutateur en fait 999 et le tambour enregistreur exécute un tiers de révolution. Ces chiffres correspondent à deux ondes de signes contraires. Le tracé d'une période est ainsi assuré par 999 décharges du con-

densateur dans le galvanomètre et un tour du tambour comporte 3 périodes entières.

3) D'autres combinaisons reposent sur l'enregistrement immédiat d'un courant fourni par l'alternateur examiné.

On a vu, au chap. VI, que l'équation du mouvement d'un galvanomètre est de la forme

$$A\frac{d^2\alpha}{dt^2} + B\frac{d\alpha}{dt} + C\alpha = D\,i.$$

Le premier terme représente le couple d'inertie, le deuxième le couple amortisseur, le troisième le couple directeur et le second membre constiue le couple déviant. S'il faut que la déviation du galvanomètre soit à chaque instant proportionnelle au courant traversant l'appareil, l'équation doit se réduire à

$$C\alpha = D\,i,$$

c'est-à-dire qu'il est nécessaire que les couples d'inertie et d'amortissement puissent être négligés devant le couple directeur. Il convient donc que la masse mobile de l'instrument soit très minime et l'action directrice grande, afin que la période du galvanomètre soit très courte vis-à-vis de celle du courant à relever. Un certain amortissement est requis pour empêcher les oscillations propres de l'équipage; l'amortissement critique convient le mieux dans cette circonstance. La réactance, l'hystérésis et les courants de Foucault du galvanomètre doivent naturellement être assez faibles pour ne pas introduire de perturbations dans le courant étudié.

Le dispositif ci-après a été employé par l'auteur pour enregistrer la courbe de courant d'un alternateur tournant, sans circuit d'utilisation, d'un mouvement très lent, entretenu par un moteur électrique qui agissait par l'intermédiaire d'un mécanisme retardateur (1). L'induit de la génératrice était relié à un galvanomètre, du genre des appareils Deprez et d'Arsonval, dont le champ était produit par un électro-aimant puissant.

(1) *Bull. de l'Académie de Belgique;* 1888.

Les pièces polaires de celui-ci étaient constituées par deux

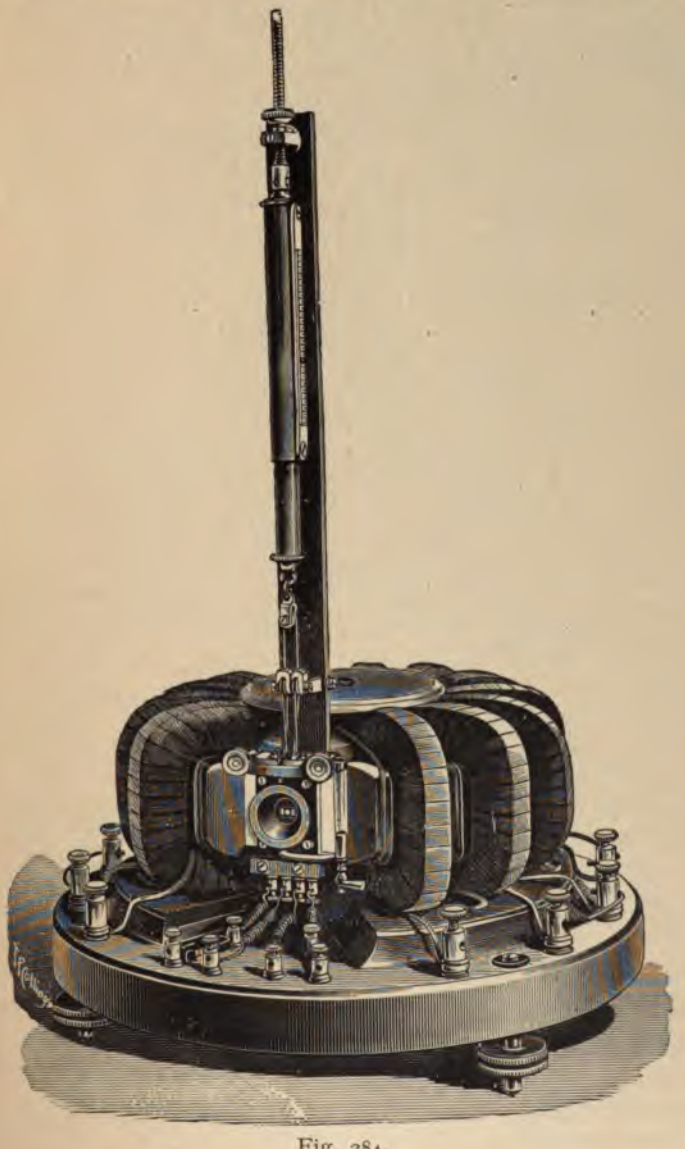


Fig. 284.

plaques de fer parallèles et rapprochées, entre lesquelles

oscillait une petite bobine galvanométrique très légère et portant un miroir. La suspension métallique de cet équipage était réglée de manière que la période d'oscillation du système mobile en circuit ouvert ne dépassât pas la vingtième partie de la période de la force électromotrice de la machine. Dans ces conditions, les déviations n'étaient pas sensiblement altérées par les réactions propres de l'appareil. Un shunt rendait ce dernier apériodique. Les déplacements du miroir, inscrits par le procédé photographique de l'auteur, chap. II, donnaient directement la courbe cherchée.

4) M. Duddell a modifié l'oscillographe précédent en vue de l'application aux courants alternatifs de fréquence usuelle, fig. 284. Dans ce but, il a remplacé la bobine galvanométrique par deux bandes métalliques, tendues parallèlement dans l'entrefer d'un électro-aimant et traversées en sens inverses par le courant à enregistrer, de manière à être soumises à des efforts transversaux contraires. Un miroir fixé aux bandes accuse leurs mouvements par ses déviations. Bandes et miroir sont noyés dans l'huile de ricin, qui amortit les oscillations propres, dont la période n'excède pas 1/10000e de seconde dans certains vibrateurs.

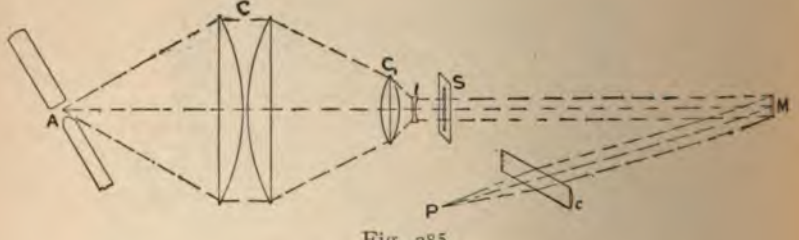


Fig. 285.

La fig. 285 montre le dispositif utilisé pour réaliser un point lumineux net, malgré les petites dimensions du miroir. Du système optique $CC_1 l$, disposé devant une lampe à arc A, émane un faisceau de lumière parallèle, dont les rayons horizontaux passant à travers la fente étroite d'un diaphragme S sont concentrés, après réflexion sur le miroir plan M du vibra-

teur, par une lentille cylindrique *c*, de manière à donner sur un écran vertical un point B très brillant.

Avec l'arrangement indiqué jusqu'ici, un courant alternatif produirait sur l'écran un trait lumineux de longueur correspondant à l'amplitude de son intensité. Pour l'enregistrement du phénomène périodique à examiner, il est nécessaire de communiquer, en outre, au faisceau réfléchi un second mouvement, normal au premier et proportionnel au temps. A cette fin, on dévie ce faisceau vers le haut à l'aide d'un miroir M' oscillant continuellement grâce à un moteur synchrone alimenté par l'alternateur qui fournit le courant étudié et interrompant la lumière incidente pendant les courses de retour du miroir additionnel. Avec le vibrateur au repos et le miroir M' en marche, le point lumineux tracerait ainsi sur l'écran, placé horizontalement, une droite perpendiculaire à celle due à la cause précédente et de longueur en rapport avec la période du courant. Le déplacement simultané des deux miroirs M et M' décrit sur l'écran une succession de courbes, visibles grâce à la persistance des impressions sur la rétine.

Souvent l'oscillographe comporte deux vibrateurs, remplissant l'un le rôle d'ampèremètre et l'autre celui de voltmètre, et dont les miroirs reçoivent, à travers deux fentes parallèles du diaphragme, des faisceaux réfléchis ensemble sur l'écran, où ils dessinent deux courbes montrant leur déphasage relatif. Si l'on ajoute, entre les miroirs vibrants, un miroir fixe frappé par un troisième faisceau lumineux, on peut obtenir, par le jeu du miroir oscillant, l'axe des abscisses du diagramme.

En remplaçant l'écran par une plaque photographique, il est possible de conserver une image durable du tracé.

5) M. Blondel a réalisé également un oscillographe convenant à l'enregistrement des courants alternatifs industriels, au moyen d'un dispositif à fer mobile, fig. 286. Une bande d'acier *p*, de 0,2 mm d'épaisseur et 0,5 mm de largeur, est tendue, par une vis à molette de réglage, entre les épanouissements polaires E E, en forme de lames, d'un puissant aimant N S. Les bobines B B, parcourues par le courant à relever, agissent en tordant la bande. Grâce à l'intensité du champ

directeur et à la forte tension de la bande, la période de vibration de celle-ci peut varier entre 1/5000e et 1/50000e de seconde. La bande est logée dans un tube en verre rempli d'huile de ricin, qui assure un amortissement proche de la valeur critique.

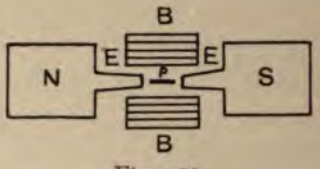


Fig. 286.

Les fig. 287 et 288 sont des vues de l'extérieur et de l'intérieur d'un oscillographe Blondel double. On voit le miroir oscillant, conduit par un petit moteur synchrone et renvoyant les faisceaux lumineux qui ont frappé les vibrateurs sur une glace

Fig. 287.

dépolie ou une plaque sensible, encastrée dans la partie supérieure de la boîte. En cas de photographie, un obturateur permet d'intercepter la lumière de manière à limiter l'enregistrement à une seule période.

6) M. Abraham a fait remarquer que, si le couple amortisseur et le couple directeur étaient négligeables devant le couple d'inertie, l'équation du mouvement d'un galvanomètre deviendrait

$$A \frac{d^2\alpha}{dt^2} = D\, i$$

et l'on pourrait obtenir la proportionnalité entre la déviation et le courant cherché en faisant passer dans l'appareil, non ce courant i lui-même, mais un courant i' dû à deux inductions successives et qui, avec des circuits de self-induction minime, serait sensiblement proportionnel à d^2i/dt^2. On aurait alors, en effet,

$$A \frac{d^2\alpha}{dt^2} = D\, i' = D' \frac{d^2 i}{dt^2}$$

et, par suite,

$$\alpha = \frac{D'}{A} i.$$

Fig. 288.

Comme il est difficile de rendre le couple amortisseur et le couple directeur négligeables, M. Abraham, en collaboration avec M. Carpentier, a combiné un oscillographe traversé 1° par le courant induit de second ordre ci-dessus, qui correspond au couple d'inertie, 2° par une fraction du courant

induit de premier ordre, qui donne un terme en di/dt répondant au couple amortisseur, et 3° par une dérivation du courant principal, pour tenir compte du couple directeur. Dans ces conditions, la déviation reste bien proportionnelle au courant étudié.

7) L'auteur a suggéré le dispositif d'enregistrement suivant. Une bande circulaire d'acier est animée d'un mouvement rotatif par un moteur synchrone, dérivé sur le générateur débitant le courant périodique à relever, pendant qu'un électro-aimant, dont les pôles embrassent la bande, est traversé par ce courant. L'acier prend ainsi des aimantations transversales en rapport avec les valeurs momentanées de celui-ci. On a soin de limiter la force magnétisante de façon à conserver sensiblement la proportionnalité entre l'aimantation et le courant. On peut d'ailleurs, avec un courant continu connu, donner une aimantation initiale servant de contrôle et qui est alternativement accrue et diminuée par le courant examiné. Quand on fait ensuite repasser la bande, aussi lentement que possible, devant une aiguille aimantée amortie, les déviations de cette dernière permettent de juger de l'intensité du courant excitateur à chaque instant d'une période.

8) M. Braun a tiré parti, pour l'enregistrement, de l'effet des champs magnétiques sur les rayons cathodiques. Le courant alternatif étudié, en passant dans une bobine appropriée, agit sur un faisceau cathodique, qui laisse alors une trace linéaire sur un écran fluorescent. La reproduction d'ondes de courant peut s'obtenir par des combinaisons de mouvements analogues à celles usitées dans les oscillographes.

Analyse expérimentale des harmoniques des grandeurs électriques périodiques. — Fourrier a montré d'une manière générale que toute fonction périodique du temps peut se mettre sous la forme d'une constante suivie d'une somme de sinusoïdes dont les fréquences croissent comme les nombres naturels :

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(at - \varphi_1) + A_2 \sin(2at - \varphi_2) + \dots$$
$$\dots + A_n \sin(nat - \varphi_n).$$

Le premier terme sinusoïdal porte le nom d'harmonique 1 ou fondamental. Les harmoniques 2, 3, ... sont dits d'ordre supérieur.

La série ci-dessus peut être simplifiée quand il s'agit des tensions et courants dus à des alternateurs. La disposition symétrique des ondes résultantes par rapport à l'axe des temps rend alors le terme constant nul et leur identité au signe près fait disparaître les harmoniques pairs, qui ne changeraient pas de signe par la substitution de $t + \pi/a$ à t. Dans ce cas, on peut donc écrire

$$f(t) = A_1 \sin(at - \varphi_1) + A_3 \sin(3at - \varphi_3) + \dots .$$

Si les ondes sont de plus symétriques par rapport aux ordonnées menées aux quarts de période, il faut que tous les harmoniques restants offrent cette même symétrie, en présentant, par suite, une valeur nulle pour $t = o$ et une valeur maxima ou minima pour $t = \pi/2a$. On sait que l'hystérésis déforme les courbes de courant à ce point de vue.

Les harmoniques supérieurs des courbes de force électromotrice des alternateurs tiennent particulièrement au mode de distribution du flux magnétique dans l'entrefer et aux dents de l'induit. On les réduit en augmentant le nombre de celles-ci et en profilant convenablement les pièces polaires En général, les harmoniques ont d'autant moins d'influence que leur ordre est plus élevé, à moins que n'interviennent des phénomènes de résonance qui les affectent spécialement.

Divers procédés graphiques ont été proposés pour séparer les harmoniques en décomposant en ses éléments une courbe tracée par points suivant le procédé de M. Joubert ou obtenue directement à l'aide d'un oscillographe. Sauf dans certains cas simples, ces constructions sont peu exactes, parce que les ondulations superposées à l'harmonique fondamental sont trop peu accusées. Il existe aussi des méthodes purement analytiques, mais elles sont ordinairement longues et d'application peu commode.

Le moyen le plus sûr, indiqué par M. Pupin, est la mise en

évidence des différents harmoniques par voie expérimentale, grâce aux phénomènes de résonance.

Supposons qu'on relie aux deux points soumis à la différence de potentiel alternative complexe à analyser un ampèremètre en série avec un condensateur de capacité C et une self-induction $\mathcal{L}$ variable. A défaut d'étalon de self-induction réglable, chap. IV, on peut utiliser des rouleaux de fil, dont on modifie les positions relatives. En appelant R la résistance du circuit ainsi ajouté et E_n l'amplitude de l'harmonique de tension de rang n, l'intensité maxima du courant correspondant est

$$I_n = \frac{E_n}{\sqrt{R^2 + \left(n a \mathcal{L} - \frac{1}{n a C}\right)^2}}.$$

L'ampèremètre marque le courant efficace global, égal à la racine carrée de la somme des carrés des courants efficaces composants tels que $I_n/\sqrt{2}$. Mais, si l'on ajuste la self-induction, au moment où la condition

$$n^2 a^2 \mathcal{L} C = 1 \qquad (1)$$

est satisfaite, le courant d'ordre n prédomine, en atteignant une valeur efficace maxima

$$\frac{I_n}{\sqrt{2}} = \frac{E_n}{R\sqrt{2}}, \qquad (2)$$

que l'ampèremètre accuse et mesure sensiblement. Un maximum semblable peut être provoqué pour chaque harmonique par le réglage de $\mathcal{L}$.

L'essai gagne en netteté si, au lieu de se servir d'un ampèremètre, on dérive sur le condensateur un électromètre de capacité négligeable. Au moment de la résonance, la tension efficace aux bornes du condensateur devient approximativement

$$\frac{V_n}{\sqrt{2}} = \frac{E_n}{n a C R \sqrt{2}} = n a \frac{\mathcal{L}}{R} \frac{E_n}{\sqrt{2}}. \qquad (3)$$

On voit qu'elle croît avec la constante de temps $\mathcal{L}/R$. On ne peut pas remplacer l'électromètre par un voltmètre électrody-

namique ou thermique, à moins que la résistance de cet appareil ne soit suffisante pour éviter une perturbation appréciable dans le résultat. Il convient de prendre des précautions pour soustraire à des surtensions dangereuses le condensateur, qui doit être prévu pour des voltages assez élevés.

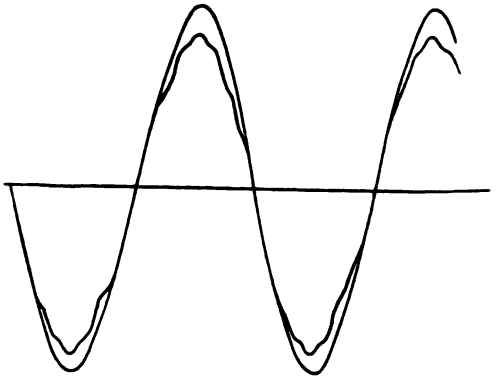


Fig. 289.

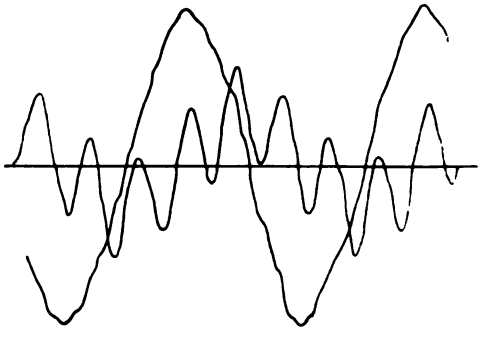


Fig. 290.

La méthode considérée permet de déterminer par l'équation (1) l'ordre des harmoniques de la différence de potentiel étudiée et d'apprécier leur amplitude par l'équation (2) ou (3), mais elle ne renseigne pas leurs déphasages relatifs, dont la connaissance est nécessaire dans le cas d'ondes complexes non symétriques par rapport aux ordonnées correspondant aux quarts de période.

On peut arriver à préciser la phase de chaque harmonique, tout en rendant l'expérience plus sensible, par l'usage d'un oscillographe double, comme l'a préconisé M. Armagnat. Un des vibrateurs, monté en voltmètre, sert à enregistrer la courbe complexe de la différence de potentiel agissante. L'autre est utilisé comme ampèremètre en série avec le condensateur et la self-induction variable. En réglant cette dernière, on voit successivement s'accuser, dans le tracé du second vibrateur, les divers harmoniques du courant, dont l'amplification est maxima et qui sont en phase avec les harmoniques de tension qui les produisent quand la condition de résonance $n^2 a^2 \mathcal{L} C = 1$ est réalisée en ce qui les concerne. Si le courant est trop intense pour le circuit ampèremétrique de l'oscillographe, on peut effectuer le raccordement par l'intermédiaire d'un transformateur statique à faible aimantation. Les fig. 289 et 290 représentent les harmoniques de courant d'ordre 1 et 5 superposés, par le procédé ci-dessus, à la ligne complexe de différence de potentiel.

Mesure des fréquences. — Si N désigne le nombre de tours par seconde d'un alternateur, dont l'alternateur possède $2p$ pôles alternativement de noms contraires, la fréquence de la machine vaut

$$f = p\,\mathrm{N} \text{ périodes par seconde.}$$

La vitesse de rotation peut être évaluée au moyen d'un tachymètre ou d'un compte-tours.

Les procédés suivants permettent de déterminer la fréquence sans disposer de l'alternateur.

On peut se servir d'un oscillographe ou, plus simplement, enregistrer, sur un cylindre tournant à une vitesse connue, les étincelles éclatant dans le circuit secondaire d'une bobine d'induction, dont l'enroulement primaire est traversé par tout ou partie du courant débité par l'alternateur. Une échelle des temps peut aussi être graduée simultanément par le moyen indiqué à la page 49.

Divers disposifs sont basés sur la résonance.

MM. Moller et Bedell ont imaginé de faire passer le courant alternatif dans un fil métallique, tendu entre les pôles d'un

aimant puissant et dont un cavalier mobile délimite la longueur utile. Lorsque le déplacement du cavalier fait correspondre la période d'oscillation du fil à celle du courant, le premier prend un mouvement vibratoire très accentué.

Comme l'échauffement par effet Joule est susceptible d'altérer la période du fil, il vaut mieux envoyer le courant dans un électro-aimant agissant sur une bande de fer de longueur variable. On peut arriver ainsi à une approximation de 0,2 pour 100 dans l'estimation de la fréquence.

MM. Kempf et Hartmann ont réalisé un fréquencemètre de même espèce en faisant pivoter l'électro-aimant devant une série d'anches d'acier accordées sur des périodes croissantes. Quand on arrête l'électro-aimant devant l'anche qui vibre le plus fortement, on lit sur une échelle la fréquence du courant en jeu. Par l'épanouissement des pièces polaires de l'électro-aimant, il est possible d'influencer simultanément les diverses anches.

Un électro-diapason à période régable par des poids mobiles sur ses branches fournit également un mode de recherche commode. Pendant le passage du courant dans la bobine de l'appareil, on fait glisser les poids, le long d'une graduation empirique, jusqu'à obtenir l'intensité de son maxima.

Certains expérimentateurs ont eu recours à la stroboscopie.

Illuminons, au moyen d'une lampe à arc alimentée par l'alternateur étudié, un disque blanc sur lequel est tracé un secteur noir. Faisons tourner ce disque de plus en plus vite, à l'aide d'un électromoteur à vitesse réglable. A un moment donné, le secteur se détachera nettement et paraîtra immobile dans une certaine position. Le nombre de tours du moteur par seconde est alors égal au nombre d'alternances par seconde du courant dans l'arc, c'est-à-dire au double de la fréquence cherchée. Si le moteur possédait une vitesse moitié moindre, le secteur se détacherait deux fois par révolution et on aurait l'illusion de deux secteurs immobiles. D'une manière générale, quand le nombre de tours par seconde du moteur est N et le nombre de secteurs fixes aperçus m, $f = Nm/2$.

On peut aussi éclairer par la lampe à arc un disque animé

d'une vitesse N constante et portant $2p$ secteurs alternativement noirs et blancs. On observe, dans ce cas, une vitesse apparente répondant à l'expression $2f/p - N$ et dont le relevé permet le calcul de f.

La fréquence se déduit parfois de mesures électriques.

Si l'on a affaire à un réseau de distribution, par exemple, on peut dériver sur celui-ci une résistance inductive r, $\mathcal{L}$, dans laquelle on amène le courant à une intensité efficace donnée, en agissant sur une résistance additionnelle non inductive. La différence de potentiel efficace aux bornes de la résistance inductive étant alors simplement proportionnelle à $\sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 \mathcal{L}^2}$, le voltmètre qui l'accuse peut être gradué empiriquement de façon à renseigner directement f.

M. Arno a proposé de soumettre à la différence de potentiel du réseau, de valeur efficace V, un condensateur, de capacité C, en série avec une résistance ohmique r, qu'on règle jusqu'à ce que la chute de tension qu'y indique un électromètre soit $V/2$. On a alors la relation

$$\frac{V}{\sqrt{r^2 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 C^2}}} = \frac{V}{2r},$$

d'où l'on tire

$$f = \frac{1}{2\sqrt{3}\pi C r}.$$

Essais des alternateurs. Caractéristiques. — Quand un alternateur arrive à la plate-forme d'essai, on le soumet à une série de vérifications mécaniques, thermiques et diélectriques, semblables à celles que nous avons indiquées à propos des dynamos à courant continu.

L'évaluation de l'échauffement de l'induit est possible sans mettre la machine en charge. Il suffit de la faire tourner à vide avec l'excitation correspondant à la tension normale, de manière à provoquer dans le fer de l'armature les pertes par hystérésis et courants de Foucault, et d'envoyer en même

temps dans l'induit un courant continu égal au courant efficace de régime. Pour éviter du courant alternatif dans le générateur qui fournit le courant auxiliaire, on s'arrange de manière que la force électromotrice résultante de l'alternateur soit nulle, par exemple en couplant les bobines induites en opposition. Dans le cas d'armatures triphasées, on peut grouper les trois enroulements en triangle et ouvrir ce dernier pour le raccorder à la source auxiliaire. Si l'alternateur est à haute tension, il faut prendre la précaution de réunir un point du circuit à courant continu à la masse, pour se prémunir contre toute élévation de potentiel dangereuse.

Parmi les particularités qui se rencontrent parfois lors de la mise en marche des machines à courants alternatifs, signalons le ronflement qui provient spécialement de la saturation des dents de l'induit et qu'on peut atténuer entr'autres par un accroissement de l'entrefer. Si l'on constate une insuffisance marquée de force électromotrice, on recherchera s'il n'y a pas d'erreurs dans les connexions des bobines inductrices. Une chute de tension trop grande en charge peut être corrigée par une augmentation d'excitation.

Pour charger les alternateurs, on fait usage de résistances avec ou sans réactance.

Des circuits non inductifs peuvent être constitués aisément avec des lampes à incandescence, lorsqu'il s'agit de petites génératrices à bas voltage. Pour les machines à tension élevée, on utilise des résistances liquides, qui sont peu coûteuses et ne donnent pratiquement pas d'effets de capacité gênants. Si l'on dispose d'une eau courante, on peut y plonger des électrodes suspendues par des isolateurs à des poulies, de manière à permettre de régler l'immersion. En cas de courants triphasés, ces électrodes sont placées aux angles d'un triangle équilatéral. La surface de contact avec le liquide doit être suffisante pour éviter une gaine lumineuse dans les gaz entourant les plaques : il faut au moins 0,4 dcm^2 par ampère. On immerge quelquefois les électrodes dans des caniveaux où l'on ménage un renouvellement d'eau, par exemple, dans trois canaux orientés en étoile quand il s'agit de courants triphasés. On varie les résis-

tances en déplaçant les plaques suivant les branches de l'étoile. On emploie aussi des caniveaux parallèles, réunis par un canal perpendiculaire, auquel on donne une section beaucoup plus forte, pour que les résistances des diverses phases puissent être considérées comme égales.

Quand on doit soumettre les alternateurs à des charges inductives, on a recours à des électro-aimants à noyaux mobiles ou à des stators de moteurs asynchrones, mis en parallèle ou en série avec des résistances liquides. On se sert aussi de transformateurs statiques, dont on fait varier la self-induction apparente en fermant le secondaire sur des résistances réglables. On peut ainsi graduer le facteur de puissance primaire entre 0,7 et 1, cette dernière valeur correspondant au court-circuit du secondaire.

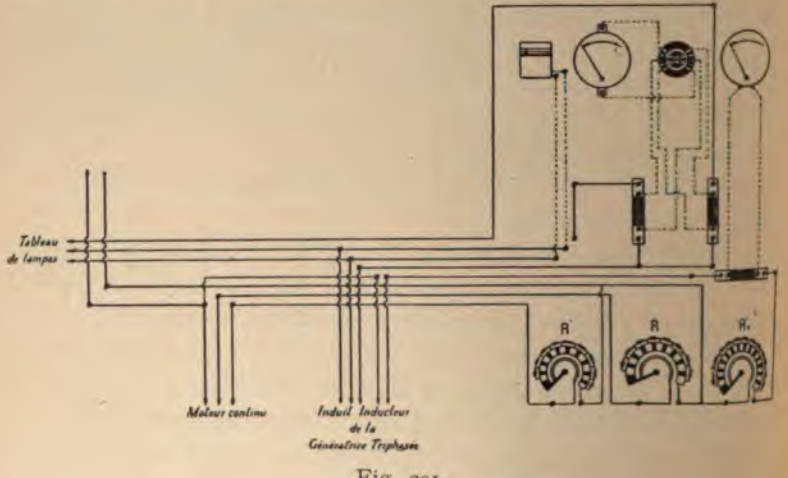


Fig. 291.

La fig. 291 montre les connexions permettant le relevé des caractéristiques d'un alternateur triphasé, attaqué par un moteur à courant continu en dérivation. Un voltmètre est raccordé à deux des bornes induites de l'alternateur. Un ampèremètre avec shunt est intercalé dans un des fils de ligne aboutissant à l'induit de celui-ci. Un autre mesure le courant dans son inducteur. Après s'être assuré que les manivelles de

tous les rhéostats de l'installation sont sur la touche ∞, on ferme le disjoncteur automatique à maxima du moteur et on met ce dernier en marche en amenant successivement les manivelles de son rhéostat de champ R′ et de son rhéostat de démarrage R sur la touche de résistance nulle.

Pour tracer la caractéristique à circuit ouvert de l'alternateur, on varie l'excitation de celui-ci en agissant sur le rhéostat R'_1 et l'on a soin de maintenir la vitesse constante à l'aide du rhéostat R′.

Si, pour une même excitation, on veut relever la force électromotrice à circuit ouvert en fonction de la vitesse, on modifie cette dernière au moyen des rhéostats R et R′.

La caractéristique extérieure à circuit fermé sur résistances non inductives s'obtient en faisant débiter l'alternateur sur un tableau de lampes, dont on change le nombre également dans les trois phases. On maintient, à l'aide du rhéostat R'_1, l'excitation de l'alternateur à la valeur requise pour avoir à vide la tension normale avec la vitesse de service. En combinant aux lampes des résistances inductives, il est possible de déterminer des caractéristiques correspondant à des facteurs de puissance différant de l'unité. On s'aide alors d'un phasemètre pour contrôler la constance du déphasage pendant toutes les observations se rapportant à une même courbe.

Si, lors des essais en charge, on introduit un wattmètre dans le circuit d'utilisation, on peut dresser des diagrammes montrant les variations de la puissance électrique disponible avec le courant débité et le facteur de puissance extérieur.

Une expérience dont l'utilité sera reconnue plus loin est le tracé de la caractéristique de courant en court-circuit. On réunit, dans ce but, les trois bornes figurées au-dessus du rhéostat R′ et l'on note l'intensité des courants induits obtenus avec des courants inducteurs progressivement croissants. Au lieu d'un ampèremètre relié par des conducteurs de résistance négligeable, d'une part, à une des bornes de l'induit et, d'autre part, à l'ensemble des deux autres bornes, on préfère souvent, pour établir le court-circuit, faire usage de trois ampèremètres, montés entr'eux en étoile, et prendre la moyenne de leurs indications.

On peut encore rechercher comment le courant d'excitation, nécessaire pour maintenir aux bornes le voltage normal, dépend du débit et du facteur de puissance.

Les essais effectués sur les moteurs synchrones sont analogues à ceux qu'on exécute sur les alternateurs générateurs. Il est utile de construire, en outre, les courbes en V de ces moteurs. A cet effet, on alimente le moteur essayé sous une tension constante et on maintient la puissance mécanique qu'il développe invariable; on observe les courants absorbés par l'induit pour diverses excitations. On répète ces mesures pour différentes charges.

Prédétermination de la chute de tension. — La détermination directe de la chute de tension d'un alternateur dans les diverses conditions de service entraîne à des expériences assez complexes, puisqu'on est obligé de faire fonctionner la machine à des puissances et avec des facteurs de puissance variés. De plus, il faut un moteur capable d'actionner l'alternateur en charge, ce qu'on ne trouve ordinairement pas dans les ateliers où l'on construit les grandes génératrices.

Il existe heureusement des procédés qui permettent de prévoir approximativement, d'après la caractéristique à circuit ouvert et la caractéristique de courant en court-circuit, la différence de potentiel aux bornes qu'un alternateur est susceptible de fournir en desservant un circuit extérieur donné. Les deux courbes requises peuvent être relevées en attaquant l'alternateur par un moteur dont la puissance ne dépasse pas 12 à 15 pour 100 de la puissance nominale de la génératrice. Souvent l'excitatrice de celle-ci suffit pour l'entraînement.

Désignons, d'une manière générale, par E la valeur efficace de la force électromotrice dans chacune des phases de l'induit à circuit ouvert et par I l'intensité efficace du courant dans chacune d'elles quand l'armature est mise en court-circuit. La caractéristique à circuit ouvert $E = f(i_e)$ et la caractéristique de courant en court-circuit $I = f'(i_e)$ ne passent pas par l'origine des coordonnées, fig. 292, mais coupent l'axe des courants d'excitation i_e à gauche de celle-ci, s'il y a du magnétisme

rémanent. Il ne faut généralement pas plus du tiers du courant inducteur correspondant à la force électromotrice normale à circuit ouvert pour obtenir l'intensité de pleine charge en court-circuit, mais on peut pousser sans danger, pendant quelques instants, le courant de court-circuit jusqu'à 1,5 fois cette dernière valeur.

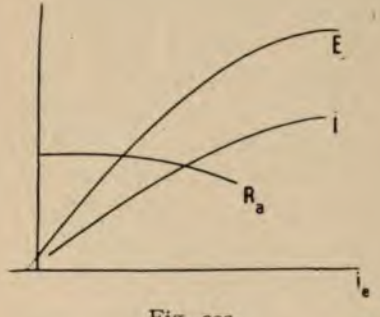


Fig. 292.

N'étaient les effets de saturation magnétique et de réaction d'induit, les deux courbes considérées, dont la première partie est rectiligne, resteraient droites sur toute leur étendue et le rapport E/I de leurs ordonnées en coïncidence, égal à l'impédance intérieure R_a d'une phase de l'induit, présenterait la même valeur pour toutes les excitations. On pourrait alors poser $R_a = \sqrt{R^2 + a^2 \mathcal{L}^2}$, en appelant R la résistance et $\mathcal{L}$ la self-induction constante de l'induit par phase.

Dans ces conditions, il est possible d'analyser très simplement, par la méthode vectorielle, les diverses tensions en jeu, fig. 293. Soit, en effet, pour un alternateur monophasé par exemple, V la différence de potentiel efficace aux bornes, en avance d'un angle φ sur le courant efficace I débité dans un circuit extérieur inductif. La chute de tension dans la résistance R de l'induit est IR et la différence de potentiel nécessaire pour vaincre la self-induction $\mathcal{L}$ de l'armature vaut $a\mathcal{L}$I. En ajoutant géométriquement au vecteur OA de V les vecteurs AC et CB de IR et $a\mathcal{L}$I, dont le premier est parallèle et le second normal au vecteur du courant, on trouve le vecteur OB définissant la force électromotrice, de valeur efficace E,

due au courant inducteur. Le vecteur A B représente la force électromotrice $e = I\sqrt{R^2 + a^2\mathcal{L}^2} = I R_a$ capable de produire le courant I dans l'alternateur en court-circuit. Il est en avance sur le vecteur de I d'un angle α voisin de $\pi/2$, $a\mathcal{L}I$ étant très supérieur à I R. On a d'ailleurs $\alpha = \text{arc tang } a\mathcal{L}/R$. On remarquera que l'angle O A B, égal à $\pi + \varphi - \alpha$, se réduit à $\pi/2 + \varphi$, si l'on peut assimiler α à un angle droit.

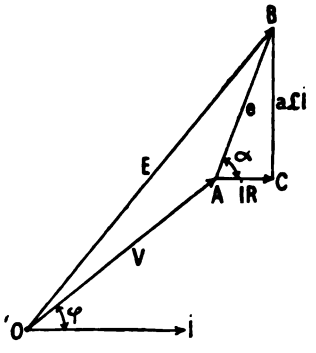


Fig. 293.

Notons, en passant, que, R_a ne différant guère de $a\mathcal{L}$, la vitesse de rotation importe peu dans la marche en court-circuit, attendu que la force électromotrice développée par le flux inducteur et la réactance $a\mathcal{L}$, dont le quotient détermine pratiquement le courant de court-circuit, croissent tous deux proportionnellement à la vitesse.

En réalité, l'impédance de l'induit ne peut pas être traitée comme une quantité constante. De plus, il intervient encore, dans le fonctionnement d'un alternateur, des forces électromotrices supplémentaires, négligées ci-dessus et provenant notamment des dispersions de flux dans l'entrefer. D'autre part, si l'on considère les flux agissants, il y a des objections à l'emploi du calcul vectoriel, qui ne convient qu'à un milieu homogène, alors que les alternateurs, avec leurs pôles distincts, s'écartent notablement de cette condition. Dans le cas d'un milieu homogène seulement, le diagramme des tensions peut,

moyennant des changements d'échelle, s'appliquer aux flux correspondants et aux ampères-tours donnant naissance à ceux-ci.

Devant ces difficultés, on se contente habituellement de méthodes plus ou moins approchées. Nous indiquerons celles de M. Behn-Eschenburg et de M. Rothert, qui sont répandues dans les ateliers de construction. Il y a d'autres procédés plus détaillés, mais qui exigent des ressources expérimentales dont on dispose rarement dans les usines et pour lesquels nous renvoyons à nos *Leçons sur l'Électricité*.

Après avoir tracé la caractéristique à circuit ouvert $E = f(i_e)$ et la caractéristique de courant en court-circuit $I = f'(i_e)$, M. Behn-Eschenburg dresse la courbe $R_a = f''(i_e)$, dont les ordonnées sont les rapports E/I des ordonnées correspondantes de ces caractéristiques. Il procède alors comme suit, dans le cas d'un alternateur monophasé par exemple, pour résoudre le problème habituel, consistant à prédéterminer la différence de potentiel efficace V aux bornes pour une excitation i_e donnée et un courant efficace I débité dans un circuit d'utilisation dont le facteur de puissance $\cos\varphi$ est connu. Quand il s'agit d'une

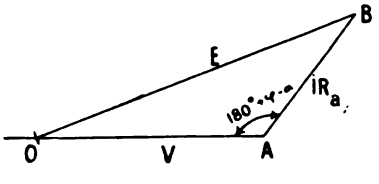


Fig. 294.

machine polyphasée, la même construction s'applique à une de ses phases.

A la suite d'une droite OA, figurant la direction du vecteur de V, menons un vecteur AB, de longueur égale à IR_a et faisant avec AO l'angle $\pi + \varphi - \alpha$, où $\alpha = \text{arc cos } R/R_a$, R étant la résistance de l'induit, fig. 294. La valeur à adopter pour R_a est celle correspondant au courant inducteur i_e en jeu. M. Behn-Eschenburg a préconisé de prendre pour R le double de la résistance de l'armature, en vue de tenir compte de la réaction

inductive des courants de Foucault provoqués par cette dernière. Si, du point B comme centre, on décrit ensuite un arc de rayon égal à la force électromotrice E développée à circuit ouvert par l'excitation i_e donnée, on obtient le point O, qui limite le vecteur O A représentant la différence de potentiel cherchée.

Le procédé ci-dessus permet aussi de trouver, par tâtonnements, la valeur de E qui correspond à des valeurs de V, I et φ déterminées. Nous avons déjà fait observer qu'il n'y a pas grande erreur à faire l'angle O A B égal à $\pi/2 + \varphi$, ce qui facilite la résolution des questions.

M. Rothert opère différemment, en composant, non les tensions, mais des courants d'excitation qui, dans une certaine mesure, leur sont proportionnels. Soit encore à prédéterminer V, connaissant E, I et φ. Sur une droite faisant avec une autre A O l'angle $\pi/2 + \varphi$, fig. 295, portons en A B le courant d'exci-

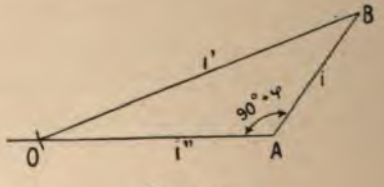


Fig. 295.

tation i qui, sur la caractéristique de courant en court-circuit, correspond au courant induit I imposé. Du point B, traçons ensuite un arc de rayon égal au courant d'excitation i' se rapportant, sur la caractéristique à circuit ouvert, à la force électromotrice E donnée. Nous délimitons ainsi un courant d'excitation $i'' = O A$ qui, sur la caractéristique à circuit ouvert, conduit à une ordonnée mesurant V. Ce diagramme revient à considérer le flux effectif dans l'armature comme la résultante du flux inducteur et d'un flux de réaction d'induit.

En somme, M. Behn-Eschenburg résume les phénomènes internes de l'armature dans une impédance, tandis que M. Rothert y substitue une réaction magnétique. La première méthode a une tendance à exagérer le courant inducteur, d'autant plus accusée qu'il s'agit de machines plus saturées.

Avec les fortes saturations, actuellement assez recherchées pour réduire la chute de tension en charge, le second procédé, qui présente le défaut inverse, donne des indications plus exactes. Pour les alternateurs à aimantation modérée, on peut adopter la moyenne des résultats fournis par les deux systèmes, à moins d'avoir les moyens de pousser l'approximation plus loin grâce aux méthodes plus précises auxquelles il a été fait allusion plus haut.

Mesure du rendement. Procédé électromécanique direct. — La détermination du rendement d'un alternateur peut s'effectuer directement en évaluant, par l'un des moyens signalés précédemment, la puissance mécanique absorbée par l'arbre, tandis que la puissance électrique aux bornes de l'induit est estimée par l'une des méthodes convenant aux courants alternatifs. A moins de convention contraire, on fait fonctionner la machine dans des conditions de coïncidence entre les phases du courant et de la différence de potentiel fournis au circuit extérieur desservi. Quand on considère l'alternateur isolément, il suffit de tenir en outre compte de la dépense par effet Joule dans son enroulement inducteur, mais, si l'on cherche l'effet utile de l'ensemble de l'alternateur et de l'excitatrice, il faut encore faire intervenir les pertes de cette dernière.

Le procédé indiqué nécessite souvent des moteurs plus puissants que ceux dont les ateliers de construction disposent. En outre, l'incertitude du rendement organique de la machine motrice constitue généralement une cause d'erreur importante. Pour ces raisons, on préfère, comme pour les dynamos à courant continu, les méthodes supprimant les mesures mécaniques ou restreignant considérablement la portée de leur inexactitude, tout en n'exigeant que des moteurs de puissance beaucoup plus faible que celle des alternateurs à examiner. L'essai direct d'un groupe électrogène est toutefois le seul qui renseigne complètement sur les qualités mécaniques, sur les frottements amenés par les courroies et sur l'importance réelle des pertes électromagnétiques en charge.

Emploi d'alternateurs couplés. — Lorsqu'on dispose de

deux alternateurs identiques, il est possible de faire tourner l'un comme moteur pour entraîner l'autre jouant le rôle de générateur. On règle les machines de manière que la moyenne de leurs puissances corresponde au régime nominal. Le rendement de chacune d'elles est alors sensiblement égal à la racine carrée du rapport de la puissance débitée par le générateur à la puissance absorbée par le moteur et les deux excitations.

Ce procédé réclame une source auxiliaire de courant alternatif importante, à moins de relier les circuits induits entr'eux de façon que le générateur envoie son débit dans le moteur, auquel cas il suffit de fournir à l'ensemble une puissance électrique équivalente aux pertes totales du système.

On peut aussi avoir recours à un électromoteur taré pour entretenir mécaniquement le mouvement des deux machines solidarisées par leurs arbres et associées par leurs armatures. Quand ces dernières présentent à leurs bornes communes la tension normale et sont traversées par le courant de pleine charge, relevons la dépense w dans les inducteurs et la puissance effective p développée par le moteur auxiliaire. Si W est la puissance électrique nominale des alternateurs étudiés, le rendement de ceux-ci vaut très approximativement

$$W/(W + \frac{1}{2}w + \frac{1}{2}p).$$

Le couplage électrique et mécanique, qui, avec un manchon à calage réglable, permet de varier les relations de phase des deux machines, donne lieu à des distorsions de flux différentes dans celles-ci et, partant, à des déchets par hystérésis et courants de Foucault inégaux, ce qui tend à fausser les résultats.

On a essayé d'en étendre le principe à un alternateur unique conduit par un moteur taré, en partageant les bobines induites en deux groupes dissemblables, qu'on oppose l'un à l'autre, de manière à obtenir la circulation locale du courant normal, mesuré par un ampèremètre. L'une des parties de l'armature fonctionne ainsi comme génératrice et l'autre lui oppose une force contre-électromotrice, à la façon d'un alternomoteur. Cette combinaison, qui exige des connexions assez compli-

quées avec les machines polyphasées, a l'inconvénient de conduire à des déformations de flux anormales.

Méthodes indirectes par évaluation des pertes. — Le rendement d'une machine alternative étant égal au quotient de la puissance disponible par cette même quantité additionnée des diverses pertes intérieures, il est possible de le calculer quand on connaît ces dernières.

Les déchets J et J′ par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur se déduisent de la résistance à chaud de ces organes et de l'intensité de leurs courants de régime.

La somme des pertes F par frottements, H par hystérésis et C par courants de Foucault s'estime ordinairement en entraînant l'alternateur par un électromoteur taré, son excitation étant réglée de manière à donner, à circuit extérieur ouvert et avec la vitesse normale, une tension efficace aux bornes mesurée par la résultante vectorielle de la différence de potentiel de service et de la chute ohmique de pleine charge. L'excitatrice est souvent utilisée comme moteur à courant continu dans cet essai.

On peut aussi trouver approximativement les déchets $F + H + C$ en faisant fonctionner la machine comme moteur synchrone à vide, avec l'excitation ajustée de façon à réduire le courant dans l'induit au minimum, et en mesurant au wattmètre la puissance prise par l'armature, mais ce procédé est susceptible d'erreurs plus fortes que le précédent.

On sait que les pertes tirées d'une marche sans charge ne correspondent pas tout à fait aux pertes en charge, parce que, dans ces dernières conditions, les distorsions de flux aggravent les déchets par hystérésis et courants de Foucault, en même temps que les frottements sont accrus. On a constaté, pour de nombreuses machines, un écart voisin de 10 pour 100.

C'est pourquoi l'on procède parfois à un essai supplémentaire en court-circuit, où le moteur taré fait tourner l'alternateur dont les bornes induites sont directement réunies par un ou plusieurs ampèremètres, comme on l'a vu à propos des caractéristiques, et dont l'inducteur reçoit le faible courant nécessaire pour l'obtention du débit normal. La puissance effective

du moteur auxiliaire représente alors, outre les frottements, qu'on peut soustraire en les déterminant séparément, l'effet Joule J dans l'induit, ainsi que les pertes $H' + C'$ par hystérésis et courants parasites, dues, pour une minime part, au courant d'excitation et, en majeure partie, au flux développé par l'armature. La pratique montre que, si W désigne la puissance électrique nominale de l'alternateur, le rendement cherché vaut sensiblement

$$\eta = \frac{W}{W + (F + H + C) + (J + H' + C') + J'}.$$

Aux alternateurs peut encore s'étendre la méthode de ralentissement, dont on a étudié plus haut l'application aux dynamos à courant continu et qui se prête, comme pour celles-ci, commodément à la séparation des divers genres de pertes, autres que l'effet Joule, dont ils sont le siège.

Il va de soi que, par tous ces procédés, il est possible de rechercher le rendement correspondant à n'importe quelle charge.

Essais des commutatrices. — Les commutatrices se comportant, à certains égards, comme des moteurs synchrones, on peut les soumettre aux essais généraux convenant à ceux-ci, en remarquant que, si on leur fait débiter du courant continu, la réaction d'induit devient très faible. Il convient, entr'autres, de tracer les courbes en V, afin de déterminer l'excitation la plus favorable, avec laquelle doit s'opérer la mesure du rendement. Il convient d'utiliser dans les expériences les courants d'alimentation de service, car la présence de certains harmoniques produit parfois des perturbations.

Les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault d'une commutatrice peuvent être évaluées en entraînant la machine à vide par un électromoteur taré, dans les conditions de vitesse et de flux voulues.

Le déchet par effet Joule dans l'induit est de la forme Kri^2, i désignant le courant continu retiré de l'armature, r la résistance de celle-ci prise du côté du collecteur à lames et K un facteur égal à 1,37 avec des courants d'alimentation mono-

phasés, 0,56 avec des courants triphasés, 0,37 avec des courants tétraphasés et 0,26 avec des courants hexaphasés.

L'effet Joule dans l'inducteur s'obtient de la façon ordinaire.

Si l'on dispose de deux machines identiques, il est possible de les relier entr'elles par leurs bagues, pour trouver le rendement en faisant fonctionner l'une comme convertisseur de courant continu en courants alternatifs et l'autre comme convertisseur de courants alternatifs en courant continu, et en relevant la puissance électrique fournie à la première, ainsi que celle restituée par la seconde.

La fig. 296 donne le schéma d'une installation appropriée à l'étude de deux commutatrices.

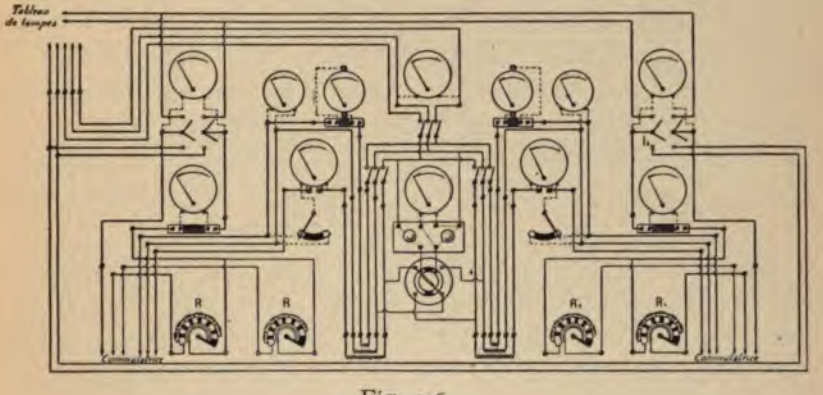


Fig. 296.

Voici, par exemple, les manœuvres à exécuter pour activer, par le courant continu d'un générateur indépendant, la machine de gauche, transmettre les courants triphasés qu'elle produit, à travers une ligne inductive artificielle, à la machine de droite et utiliser le courant continu fourni par cette dernière dans un tableau de lampes. Toutes les clefs étant ouvertes et les manivelles de tous les rhéostats occupant la position de résistance infinie, on abaisse le commutateur bipolaire à deux directions de gauche et l'on amène, l'une après l'autre, sur la touche de résistance nulle, les manivelles du rhéostat d'excitation R′ et du rhéostat de démarrage R. On agit de même sur le commu-

[illegible] droite, ainsi [illegible] démarrage [illegible] mises en marche à vide [illegible] raccordé les lampes [illegible] commutateur et [illegible] de droite, [illegible] rendre les périodes [illegible] suffisamment longues. [illegible] interrupteur tripolaire [illegible] deux machines en [illegible] commutateur bipo- [illegible] charger le tableau de [illegible]

[illegible] supprime les lampes, on [illegible] directions de droite. [illegible] ne sur la touche [illegible] et R, enfin on [illegible] directions de gauche. [illegible] en parallèle des [illegible]

[illegible] graphique. [illegible]

Chapitre XXXIII.

MOTEURS ASYNCHRONES.

Généralités. — Lorsqu'un moteur d'induction arrive à la plate-forme d'essai, on le soumet à des vérifications mécaniques, thermiques et électriques analogues à celles dont il a été question à propos des autres types de machines.

La mesure des résistances du stator et du rotor peut déceler certaines erreurs dans les connexions. Ce serait le cas si les valeurs trouvées pour les diverses phases étaient manifestement inégales. Avec les systèmes triphasés, on déduit la résistance individuelle de chacun des trois enroulements groupés en triangle ou en étoile de trois expériences donnant les résistances combinées entre les bornes extérieures prises deux à deux.

Parmi les renseignements pratiques reportés à la fin de ce volume, dans un tableau, qui s'étend d'ailleurs aux diverses espèces de machines électriques, sont signalés les principaux défauts que peut révéler la mise en marche d'un moteur d'induction et examinées les causes susceptibles de les provoquer, ainsi que les particularités par lesquelles ils se manifestent.

Mesure du glissement. — Le glissement s d'un moteur asynchrone s'exprime, en fonction du nombre de tours par

minute N_1 correspondant au synchronisme et du nombre de révolutions par minute N_2 qu'accomplit le rotor, par la formule $(N_1 - N_2)/N_1$, ou, en pour cent, par $100(N_1 - N_2)/N_1$. De 6 à 7 pour 100 dans les petits moteurs, il descend, en pleine charge, jusque 2 pour 100 dans les grands.

1) On peut estimer le glissement en déterminant la vitesse du rotor à vide,qui est sensiblement celle du synchronisme, et sa vitesse en charge. Il faut avoir soin de ne pas appuyer le compte-tours au point d'augmenter d'une manière appréciable le frottement dans les paliers. Cette méthode est peu exacte, car de petites erreurs de sens contraires sur N_1 et N_2 amènent une différence considérable dans le numérateur $N_1 - N_2$.

2) Il est préférable de relever directement l'excès $N_1 - N_2$, qui est proportionnel à la fréquence du courant dans l'induit.

Si l'on intercale dans le circuit du rotor un ampèremètre électromagnétique du genre Weston, ou si l'on dérive un millivoltmètre du même type sur deux des frotteurs reliés au rhéostat de démarrage, on compte aisément, avec les moteurs puissants, le nombre n d'excursions que l'aiguille effectue par minute du même côté du zéro et, en appelant $2p$ le nombre de pôles ou de champs tournants du moteur, on a $N_1 - N_2 = n/p$. Au besoin, on peut se contenter d'approcher une aiguille aimantée d'un des câbles de raccordement du démarreur.

Un téléphone peut aussi être connecté à quelques spires entourant un conducteur traversé par le courant du rotor. Si n' est le nombre de maxima par minute des sons téléphoniques, $N_1 - N_2 = n'/2p$.

3) Ces derniers procédés deviennent difficilement praticables avec les forts glissements et ne peuvent pas être appliqués aux rotors en cage d'écureuil. Il est avantageux de recourir dans ces cas à la stroboscopie.

Fixons à une extrémité de l'arbre du moteur un disque blanc présentant autant de secteurs noirs équidistants que la machine a de pôles. Éclairons-le par une lampe à incandescence ou mieux par une lampe à arc alimentée par le même alternateur que le moteur. Nous constaterons que le disque semble

tourner par rapport à un repère fixe, en sens inverse du moteur, avec une vitesse proportionnelle à $N_1 - N_2$.

Mesure du rendement. Méthode directe. — Le rendement d'un moteur asynchrone s'obtient directement en déterminant par la méthode du wattmètre la puissance électrique absorbée, tandis que la puissance mécanique développée est évaluée au frein ou en entraînant une dynamo de rendement connu. Il est utile d'estimer en même temps le facteur de puissance, qui joue un rôle important dans les applications.

La fig. 297 montre les connexions qui peuvent être adoptées

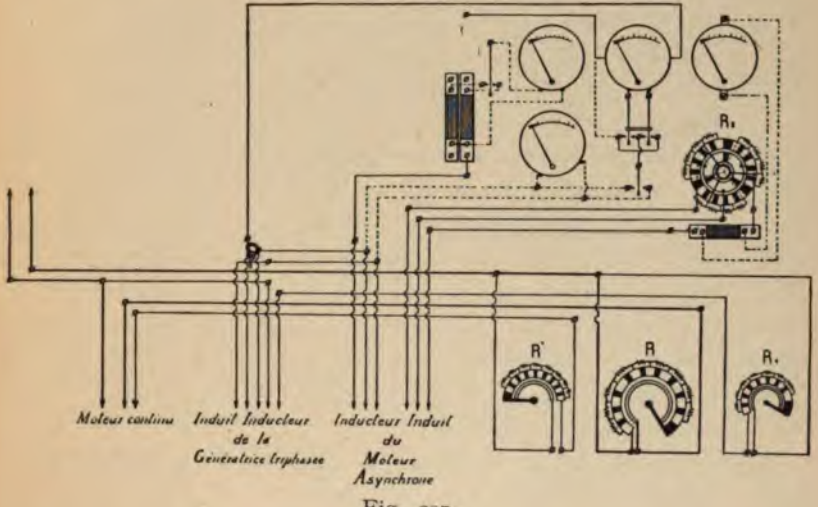


Fig. 297.

pour l'essai d'un moteur d'induction triphasé, pourvu d'un frein et alimenté par un alternateur, que meut un moteur à courant continu excité en dérivation.

Les manivelles de tous les rhéostats étant sur les touches de résistance infinie, pour mettre l'installation en marche, on ferme le disjoncteur automatique à maxima du circuit d'alimentation à courant continu; on supprime, l'une après l'autre, la résistance du rhéostat d'excitation R' du moteur continu et celle de son rhéostat de démarrage R; on règle, à l'aide du

rhéostat R_1, l'excitation de l'alternateur; on ferme l'interrupteur commandant le moteur d'induction et on amène progressivement la manivelle du démarreur R_2 de ce dernier à la position de résistance nulle. Pour l'arrêt, les manœuvres se font dans l'ordre inverse. Dans les expériences, la vitesse de l'alternateur est maintenue constante au moyen du rhéostat R' et la tension aux bornes du moteur asynchrone est rendue invariable grâce au rhéostat R_1.

La disposition indiquée permet d'étudier les variations du rendement, du facteur de puissance, du couple effectif et du glissement du moteur asynchrone avec la puissance utile relevée au frein. De ces mesures, on déduit la relation entre le couple et la vitesse, et, en laissant en service des fractions variées du rhéostat R_2, il est possible de trouver l'influence de la résistance du circuit induit sur le couple et la vitesse.

Le tableau relatif aux expériences porte, en tête, la date, la température ambiante, le n° et les données du moteur examiné, ainsi que les constantes du frein; dans des colonnes successives, viennent ensuite les n^{os} d'ordre des observations, les lectures au voltmètre, à l'ampèremètre et au wattmètre, la vitesse, le couple, la puissance mécanique, le rendement, le facteur de puissance et le glissement; enfin, dans une colonne de remarques, on inscrit les renseignements spéciaux, entr'autres, les courants de démarrage correspondant à des couples résistants déterminés.

Il est utile de mettre les résultats sous forme de courbes, qui affectent l'allure de celles de la fig. 298.

Voici, à titre d'exemple, les détails d'un essai de rendement effectué sur un moteur triphasé de 11 chevaux effectifs et 800 tours par minute, alimenté sous 240 volts efficaces aux bornes du stator.

Dans une première expérience, on a mesuré la puissance électrique absorbée par le moteur tournant à vide. Le wattmètre, employé d'après la méthode signalée à la page 345, a donné les indications suivantes :

1re lecture	2e lecture
11,8	— 1,2
11,4	— 1,2

En multipliant la somme algébrique 11,6 — 1,2 des deux lectures moyennes par le facteur de réduction de l'instrument, on obtient 733 watts.

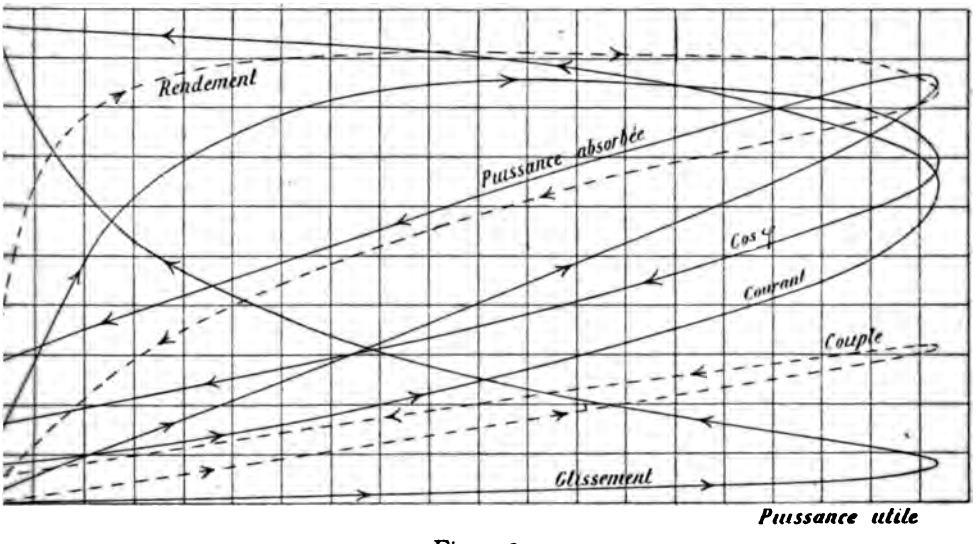


Fig. 298.

Le moteur ayant été ensuite accouplé à une génératrice continue, on a relevé sa consommation lorsque celle-ci était chargée de manière à lui faire produire sensiblement sa puissance mécanique nominale. Le wattmètre marquait alors

1re lecture	2e lecture
92,6	52,0
92,5	52,3

ce qui représente 10200 watts.

Enfin, la génératrice a été entraînée à vide, avec une excitation réalisant le même flux à travers son armature que dans les conditions de fonctionnement précédentes. Wattmètre :

1re lecture	2e lecture
22,6	9,0
22,0	9,4

soit 2215 watts.

La puissance débitée par l'induit de la génératrice dans la

deuxième expérience atteignait 6500 watts. A cette valeur, il faut ajouter, pour avoir la puissance effective correspondante du moteur : *a*) le déchet par effet Joule dans l'armature de la génératrice, valant 67,3 watts, d'après la résistance à chaud et l'intensité du courant; *b*) les pertes par hystérésis, courants de Foucault et frottements de la génératrice, ainsi que celles occasionnées par la courroie d'accouplement, dont le total peut être égalé approximativement à la différence $2215 - 733 = 1482$ watts des puissances accusées par le wattmètre dans les deux marches à vide. On arrive ainsi à $6500 + 67{,}3 + 1482 = 8049{,}3$ watts, d'où, pour le rendement du moteur,

$$\frac{8049{,}3}{10200} = 0{,}79.$$

Au régime considéré, le facteur de puissance était 0,9 et le glissement 0,0502.

Méthode indirecte. — Quand il s'agit d'un moteur d'induction puissant, il est rare qu'on dispose de moyens suffisants pour l'évaluation du rendement par voie directe. On cherche alors à déterminer les pertes intérieures de la machine, quoique les difficultés soient beaucoup plus grandes que dans le cas d'une dynamo à courant continu, dont le fonctionnement est moins complexe.

Aux déchets par frottements et ventilation, par effet Joule dans le cuivre inducteur et induit, s'ajoutent les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le rotor et le stator, où les pulsations de flux dans les dents constituent une cause appréciable de dissipation d'énergie. Une complication résulte du fait que certains de ces déchets sont liés au glissement. Dans le fer du rotor, la puissance perdue reste toutefois minime en marche normale, grâce à la lenteur avec laquelle s'y déplace le flux. D'un autre côté, on ne peut pas, comme avec un moteur continu, séparer, dans le courant d'alimentation absorbé pour la marche à vide, la part revenant à l'excitation de celle provoquant la rotation, attendu que le stator est seul relié à la source électrique. Aussi se contente-t-on ordinairement, pour obtenir le total des pertes intérieures en charge,

d'ajouter à l'effet Joule, dont le stator et le rotor sont le siège dans ces conditions, la puissance consommée par le moteur dans le fonctionnement à vide.

Voici un exemple d'essai de l'espèce, appliqué à un moteur asynchrone triphasé qui, en régime normal, absorbe $I = 24,2$ ampères efficaces sous $V = 288,5$ volts efficaces par phase du stator monté en étoile, en présentant un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,883$ et un glissement $s = 0,033$, avec une fréquence d'alimentation de 50 périodes par seconde.

Si l'on désigne par J, J′ et a respectivement l'effet Joule dans le stator, l'effet Joule dans le rotor et l'ensemble des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault, le rendement cherché a pour expression

$$\eta_1 = \frac{3\,V\,I\cos\varphi - J - J' - a}{3\,V\,I\cos\varphi}.$$

Il s'agit de déterminer les différents termes du second membre de cette égalité.

En ce qui concerne la puissance électrique reçue, il vient de suite

$$3\,V\,I\cos\varphi = 3 \,.\, 288,5 \,.\, 24,2 \,.\, 0,883 = 18\,500 \text{ watts.}$$

Pour le calcul du déchet par effet Joule dans le stator, il faut connaître la moyenne des résistances à chaud des trois phases de l'enroulement de cet organe. Des mesures par la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre ayant conduit à la valeur $r = 0,25$ ohm,

$$J = 3\,r\,I^2 = 3 \,.\, 0,25 \,.\, \overline{24,2^2} = 439 \text{ watts.}$$

En vue d'évaluer a, faisons tourner le moteur à vide en appliquant à ses bornes une différence de potentiel efficace d'environ $\sqrt{3}\,V = \sqrt{3} \,.\, 288,5 = 500$ volts et de 50 périodes par seconde, puis relevons, par le procédé des deux wattmètres, la puissance électrique que prend la machine. Soit 1065 watts le résultat trouvé. Abstraction faite de l'effet Joule à vide, on peut poser approximativement

$$a = 1065 \text{ watts.}$$

Si, dans l'expérience précédente, on ouvre brusquement les circuits du rotor, à l'aide du rhéostat de démarrage, pour noter aussitôt les indications des wattmètres, la puissance $a' = 470$ watts ainsi observée représente à peu près les pertes par hystérésis et courants de Foucault, de sorte que la puissance transmise au rotor en charge et dépensée en effet Joule dans l'induit, en frottements et en puissance mécanique utile vaut sensiblement

$$P = 3VI\cos\varphi - J - a' = 18500 - 439 - 470 = 17591 \text{ watts.}$$

Or, on sait que l'effet Joule du rotor est à la puissance totale de celui-ci dans le rapport de la vitesse de glissement à la vitesse du synchronisme. Par suite, on a, sans grande erreur,

$$J' = sP = 0{,}033 \cdot 17591 = 581 \text{ watts.}$$

Avec les chiffres ci-dessus, on obtient un rendement

$$\eta = \frac{18500 - 439 - 581 - 1065}{18500} = \frac{16415}{18500} = 0{,}888,$$

pour une puissance effective sur l'arbre de $16415/736 = 22{,}3$ chevaux.

Détermination des frottements. — La mesure des frottements d'un moteur d'induction peut s'effectuer par plusieurs méthodes.

1) Le moyen, déjà indiqué pour les dynamos et les alternateurs, consistant à manchonner élastiquement à la machine étudiée un moteur taré, pour l'entraîner à sa vitesse de régime, est susceptible d'une grande précision.

2) Le procédé suivant, qui présente de l'analogie avec la méthode de M. Hummel, évite l'emploi d'un moteur auxiliaire. On fait décroître progressivement la différence de potentiel, de fréquence constante, appliquée aux bornes du stator de la machine tournant à vide, jusqu'à la limite de marche stable, et l'on dresse le diagramme de la puissance électrique absorbée en fonction de cette tension. En extrapolant la courbe jusqu'à sa rencontre avec l'axe des ordonnées, on obtient sur celui-ci, à partir de l'origine, une longueur figurant approximativement

la puissance consommée par les frottements seuls. Cette façon d'opérer est sujette à diverses erreurs. Les indications du wattmètre sont, notamment, peu exactes, parce que le facteur de puissance du moteur est faible. Ensuite, avec les bas voltages, le glissement augmente sérieusement, ce qui réduit la vitesse de rotation et, partant, les frottements. Il est vrai que le déchet dans le fer du rotor s'accentue pour la même raison, ce qui produit une certaine compensation.

3) On peut mettre à profit la méthode de ralentissement, en éliminant la constante d'inertie par une expérience supplémentaire avec frein, comme on l'a vu à propos des machines à courant continu, ou dans laquelle une dynamo, dont on connaît le moment d'inertie et les frottements, est accouplée, par un manchon élastique, à l'alternomoteur.

On a aussi proposé de déterminer la constante d'inertie en faisant tourner la machine essayée comme moteur synchrone, avec le rotor excité par du courant continu amené par deux des bagues. On peut ainsi obtenir des vitesses variées, en soumettant le stator à des fréquences différentes, et tracer la courbe de la puissance fournie au stator en fonction de la vitesse. Si l'on a soin de régler la tension d'alimentation alternative, de manière que le courant absorbé soit minimum, la réaction d'induit est faible et l'on peut admettre que, pour une vitesse donnée, la puissance observée est alors égale à celle correspondant à la courbe de ralentissement relevée en laissant revenir le moteur au repos, avec la même excitation continue dans le rotor, après suppression du courant alternatif dans le stator. Le rapprochement des deux résultats définit donc la constante cherchée.

4) M. Benischke a suggéré une méthode simple, basée sur la proportionnalité approchée de la puissance absorbée et du glissement, lorsque celui-ci est minime, ce qui est le cas pour les faibles charges. La consommation du moteur est mesurée à vide et avec deux couples réduits, opposés par un frein à corde ou électromagnétique. On porte les glissements observés simultanément en ordonnées et les watts en abscisses. Si l'on prolonge la ligne sensiblement droite, joignant les points trouvés,

jusqu'à sa rencontre avec l'axe des abscisses, on obtient la dépense correspondant à un glissement nul, qui représente à peu près les frottements.

Moteurs monophasés à collecteur. — Les vérifications

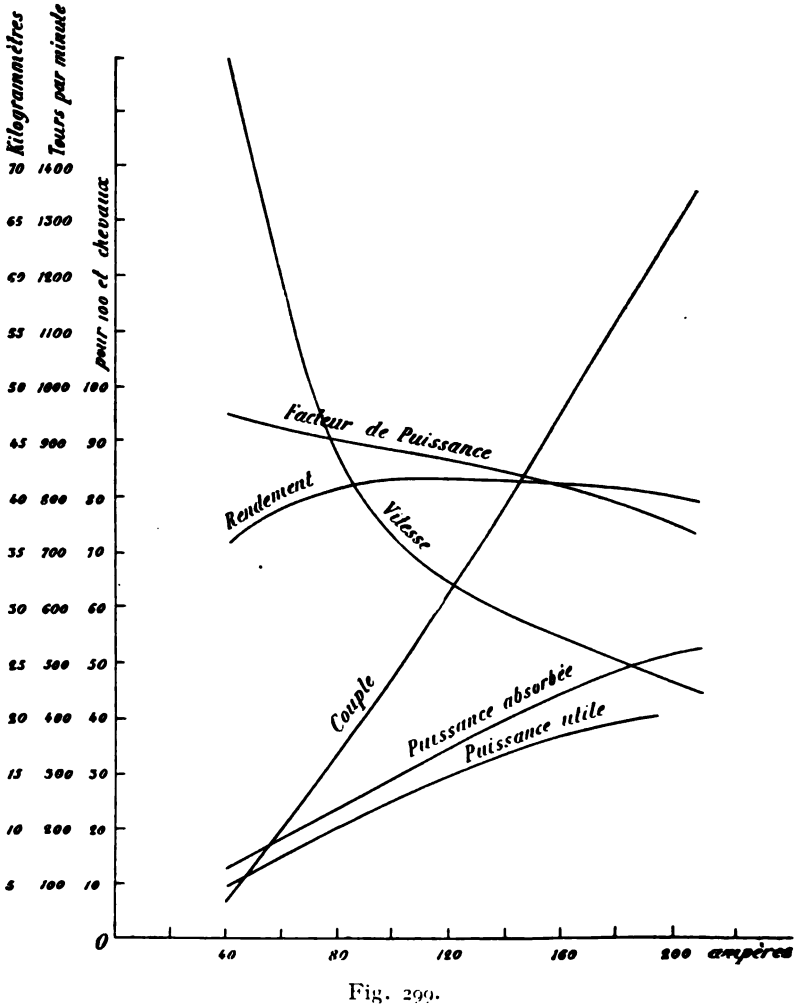


Fig. 299.

que comporte un moteur monophasé à collecteur sont analogues à celles usitées pour les machines à courant continu.

L'attention doit se porter spécialement sur le couple de démarrage et le fonctionnement du collecteur. On évalue ordinairement le rendement par la méthode directe, en alimentant le moteur sous tension constante et en le chargeant au moyen d'un frein ou d'une génératrice tarée. On note le courant reçu, la puissance absorbée, la vitesse, le couple et on en déduit la puissance utile, le rendement et le facteur de puissance. La fig. 299 montre les caractéristiques obtenues pour un moteur en série de 30 chevaux, 250 volts et 25 périodes par seconde, pourvu d'un engrenage à simple réduction, comme ceux employés avec les moteurs de tramway. Pour les différences avec les autres types de moteurs monophasés, nous renvoyons à nos *Leçons sur l'Électricité*.

Chapitre XXXIV.

TRANSFORMATEURS STATIQUES.

Objet des essais. — De même que pour les dynamos à courant continu, les alternateurs et les moteurs, il convient, avant la construction d'un transformateur, d'essayer le fer et le cuivre à utiliser. La perte par hystérésis a une importance particulière dans ce dernier cas.

Après achèvement, le transformateur doit être vérifié au point de vue mécanique et électrique.

On s'assure que les boulons réunissant les diverses parties du noyau sont bien serrés, de manière à réduire au minimum la reluctance des joints.

On vérifie au galvanoscope la continuité des circuits électriques et leur isolement, puis on procède à l'essai de rigidité diélectrique, en appliquant les tensions indiquées en annexe à la fin du volume. L'isolement laisse parfois à désirer au début, si l'on n'a pas recuit l'appareil à l'étuve pour expulser l'humidité contenue dans le coton recouvrant les conducteurs. Pour l'épreuve de rigidité, on a soin de mettre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire en court-circuit, afin d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible du potentiel. On contrôle successivement le primaire par rapport au secondaire et chacun de ces circuits par rapport à la masse. Certains

règlements exigent que l'expérience ait lieu après que le transformateur a été porté à sa température de service.

Un essai très important est la mesure du rendement, c'est-à-dire du rapport des watts utiles aux watts absorbés, sous diverses charges. Cette évaluation peut se faire directement ou par des méthodes indirectes analogues à celle de Lord Rayleigh et de M. Kapp ou à celle de M. Swinburne, décrites à propos des machines à courant continu.

Il est également utile de déterminer la température de régime, la variation de la différence de potentiel secondaire lorsque le primaire est soumis à une tension constante, ainsi que les pertes de flux.

Rapport de transformation. — Le rapport n_2/n_1 des nombres de spires secondaires et primaires d'un transformateur est égal au rapport des forces électromotrices de ces deux enroulements, en cas de dispersion de flux nulle. On peut l'estimer approximativement en soumettant le circuit de basse tension à une certaine différence de potentiel et en comparant à celle-ci la différence de potentiel obtenue aux bornes du circuit à haute tension fonctionnant à vide. Le même voltmètre ou électromètre sera utilisé pour mesurer les deux voltages, si l'on dispose d'un transformateur réducteur étalon. On peut aussi se baser sur le rapport du courant inducteur au courant induit, avec le secondaire en court-circuit.

En notant les courants correspondant à des charges croissantes, il est possible de se rendre compte de l'importance des dérivations magnétiques, qui doivent rester faibles. Un autre moyen consiste à placer, dans le voisinage du transformateur, un thermomètre à mercure et un thermomètre à alcool accolés. Les deux instruments accusent des températures différentes si le mercure est échauffé par des courants de Foucault dus au flux perdu. On peut encore apprécier les fuites magnétiques en enroulant, autour des noyaux qui y donnent lieu, des bobines exploratrices et en relevant les forces électromotrices induites dans celles-ci.

Quand plusieurs transformateurs doivent être associés en parallèle, il est nécessaire de contrôler l'égalité de leurs forces

Chapitre XXXIV.

TRANSFORMATEURS STATIQUES.

Objet des essais. — De même que pour les dynamos à courant continu, les alternateurs et les moteurs, il convient, avant la construction d'un transformateur, d'essayer le fer et le cuivre à utiliser. La perte par hystérésis a une importance particulière dans ce dernier cas.

Après achèvement, le transformateur doit être vérifié au point de vue mécanique et électrique.

On s'assure que les boulons réunissant les diverses parties du noyau sont bien serrés, de manière à réduire au minimum la reluctance des joints.

On vérifie au galvanoscope la continuité des circuits électriques et leur isolement, puis on procède à l'essai de rigidité diélectrique, en appliquant les tensions indiquées en annexe à la fin du volume. L'isolement laisse parfois à désirer au début, si l'on n'a pas recuit l'appareil à l'étuve pour expulser l'humidité contenue dans le coton recouvrant les conducteurs. Pour l'épreuve de rigidité, on a soin de mettre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire en court-circuit, afin d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible du potentiel. On contrôle successivement le primaire par rapport au secondaire et chacun de ces circuits par rapport à la masse. Certains

règlements exigent que l'expérience ait lieu après que le transformateur a été porté à sa température de service.

Un essai très important est la mesure du rendement, c'est-à-dire du rapport des watts utiles aux watts absorbés, sous diverses charges. Cette évaluation peut se faire directement ou par des méthodes indirectes analogues à celle de Lord Rayleigh et de M. Kapp ou à celle de M. Swinburne, décrites à propos des machines à courant continu.

Il est également utile de déterminer la température de régime, la variation de la différence de potentiel secondaire lorsque le primaire est soumis à une tension constante, ainsi que les pertes de flux.

Rapport de transformation. — Le rapport n_2/n_1 des nombres de spires secondaires et primaires d'un transformateur est égal au rapport des forces électromotrices de ces deux enroulements, en cas de dispersion de flux nulle. On peut l'estimer approximativement en soumettant le circuit de basse tension à une certaine différence de potentiel et en comparant à celle-ci la différence de potentiel obtenue aux bornes du circuit à haute tension fonctionnant à vide. Le même voltmètre ou électromètre sera utilisé pour mesurer les deux voltages, si l'on dispose d'un transformateur réducteur étalon. On peut aussi se baser sur le rapport du courant inducteur au courant induit, avec le secondaire en court-circuit.

En notant les courants correspondant à des charges croissantes, il est possible de se rendre compte de l'importance des dérivations magnétiques, qui doivent rester faibles. Un autre moyen consiste à placer, dans le voisinage du transformateur, un thermomètre à mercure et un thermomètre à alcool accolés. Les deux instruments accusent des températures différentes si le mercure est échauffé par des courants de Foucault dus au flux perdu. On peut encore apprécier les fuites magnétiques en enroulant, autour des noyaux qui y donnent lieu, des bobines exploratrices et en relevant les forces électromotrices induites dans celles-ci.

Quand plusieurs transformateurs doivent être associés en parallèle, il est nécessaire de contrôler l'égalité de leurs forces

électromotrices primaires et de leurs forces électromotrices secondaires, par exemple, en les mettant en opposition deux à deux par l'intermédiaire d'un ampèremètre ou d'un voltmètre. Avec les appareils polyphasés, il convient d'éprouver ainsi les diverses phases.

Échauffement. — Les températures de service tolérées pour les transformateurs sont indiquées plus loin dans les renseignements pratiques. L'essai d'échauffement imposé est parfois de très longue durée. On peut le hâter en passant l'appareil à examiner au préalable à l'étuve ou en lui appliquant au début une surcharge suivie, au bout d'un certain temps, du débit de régime. La température doit être prise avec un thermomètre à alcool, maintenu contre l'enroulement. Quand il s'agit d'un transformateur noyé dans l'huile, on se contente de suspendre le thermomètre dans la partie supérieure du bain.

Si l'on ne dispose pas des moyens requis pour faire fonctionner le transformateur en pleine charge ou si l'on désire réduire la dépense d'énergie, il est possible d'accoupler deux transformateurs, comme on le verra ci-après, à l'occasion de la détermination du rendement.

On peut aussi soumettre le circuit à basse tension à sa différence de potentiel alternative normale, de manière à échauffer le noyau par hystérésis et courants de Foucault, et provoquer l'effet Joule en envoyant le courant continu d'une batterie d'accumulateurs dans l'autre circuit, dont les spires sont groupées en opposition pour annuler la force électromotrice d'induction résultante. Avec les transformateurs triphasés, la somme instantanée des forces électromotrices des trois phases étant constamment nulle, il suffit d'ouvrir en un point le circuit des bobines secondaires montées en triangle pour y intercaler la batterie.

Quelquefois, on note l'élévation de température résultant d'une marche à vide suivie immédiatement d'un essai avec secondaire en court-circuit, réglé de façon à réaliser les courants normaux. Ce procédé est commode pour l'examen d'une

série de transformateurs de même type, mais, pour l'appréciation des résultats, il y a lieu de comparer, avec l'un des appareils, la valeur ainsi trouvée à celle que donne une méthode plus rigoureuse.

Chute de tension secondaire. — La chute de tension aux bornes secondaires d'un transformateur, alimenté par une différence de potentiel primaire constante et dont on augmente progressivement la charge, peut s'observer à l'aide d'un voltmètre dérivé sur ces bornes. Mais il vaut mieux, au point de vue de l'exactitude, opposer, par l'intermédiaire d'un voltmètre, les circuits induits de deux transformateurs semblables, dont les circuits inducteurs sont associés en parallèle. En chargeant l'un des secondaires, tandis que l'autre fonctionne à vide, on lit directement sur l'appareil de mesure la différence des tensions à leurs bornes.

En vue de déterminer la différence de potentiel secondaire dans toutes les conditions possibles d'impédance du circuit d'utilisation, il faudrait faire un très grand nombre d'expériences en variant la résistance, la self-induction et la capacité de ce dernier, de manière à dresser des tableaux renseignant par interpolation le résultat qui correspond à une impédance donnée.

M. Kapp a indiqué une méthode qui permet de trouver la différence de potentiel pour un circuit extérieur quelconque, moyennant un essai très simple, dans lequel on met le secondaire du transformateur en court-circuit sur un ampèremètre et on mesure la faible différence de potentiel efficace primaire V'_1 nécessaire pour donner ainsi au courant induit son intensité efficace normale I_2.

Soient $\mathfrak{N}$ la valeur momentanée du flux magnétique commun aux deux enroulements de l'appareil, $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ les coefficients de self-induction supplémentaires correspondant respectivement à la dispersion primaire et à la dispersion secondaire. Pendant l'expérience de court-circuit, on a, à chaque instant, les relations

$$0 = i_2 r_2 + n_2 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} + \mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt}$$

et

$$v'_1 = i_1 r_1 + n_1 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} + \mathfrak{L}_1 \frac{di_1}{dt},$$

dont la seconde devient

$$v'_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 r_1 + n_1 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} - \mathfrak{L}_1 \frac{n_2}{n_1} \frac{di_2}{dt},$$

si l'on pose, par approximation, $n_1 i_1 = -n_2 i_2$. Soustrayons la deuxième équation transformée et divisée par n_1 de la première divisée par n_2. On obtient

$$i_2 \left(\frac{r_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \frac{r_1}{n_1} \right) + \left(\frac{\mathfrak{L}_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \frac{\mathfrak{L}_1}{n_1} \right) \frac{di_2}{dt} + \frac{v'_1}{n_1} = 0.$$

Connaissant les résistances et nombres de spires des bobines, on peut donc construire, fig. 300, le triangle rectangle OAB

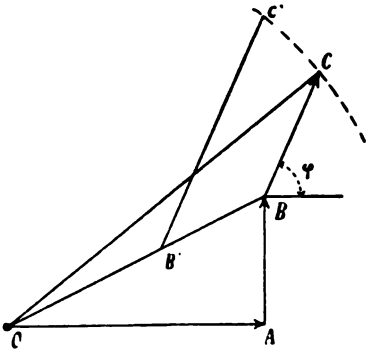


Fig. 300.

dont le côté OA et l'hypothénuse BO ont des longueurs respectivement proportionnelles aux tensions efficaces $(r_2 / n_2 + n_2 r_1 / n_1^2)\, I_2$ et $V'_1 : n_1$, et dont le côté AB définit la perte de tension due aux fuites magnétiques.

Une fois ce triangle arrêté par l'essai ci-dessus, il est possible de prédéterminer la différence de potentiel efficace secondaire V_2 correspondant à une tension efficace primaire V_1, lorsque le transformateur débite le courant I_2 dans un circuit

extérieur dont le facteur de puissance cos φ est connu. En charge, il vient, en effet,

$$o = i_2 r_2 + n_2 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} + \mathfrak{L}_2 \frac{di_2}{dt} + v_2,$$

$$v_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 r_1 + n_1 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} - \mathfrak{L}_1 \frac{n_2}{n_1} \frac{di_2}{dt}$$

et, en retranchant la dernière de ces équations divisée par n_1 de la première divisée par n_2,

$$i_2 \left(\frac{r_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \frac{r_1}{n_1} \right) + \left(\frac{\mathfrak{L}_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \frac{\mathfrak{L}_1}{n_1} \right) \frac{di_2}{dt} + \frac{v_2}{n_2} + \frac{v_1}{n_1} = o.$$

Par suite, si, du point B, on tire une droite inclinée sur OA de l'angle φ et si, du point O comme centre, on trace un arc de cercle de rayon mesurant V_1/n_1, on délimite une longueur BC, qui représente V_2/n_2, d'où V_2.

Quand l'intensité efficace du courant secondaire varie, les côtés du triangle OAB changent dans le même rapport, de sorte que, si V_1 et φ restent constants, on obtient la nouvelle valeur de V_2 en menant, du point B' correspondant au débit actuel, une parallèle B'C' à BC. Dans le cas particulier où le circuit secondaire est ouvert, les vecteurs de v_1/n_1 et v_2/n_2 se confondent en grandeur et direction.

Mesure du rendement. Méthode directe. — On détermine directement le rendement d'un transformateur statique en relevant les watts utiles aux bornes secondaires et les watts dépensés aux bornes primaires. Le rendement dépend rigoureusement de la forme de la courbe périodique de la tension appliquée. On effectuera donc l'essai, à la fréquence normale, avec une différence de potentiel primaire autant que possible sinusoïdale et, à moins de stipulation contraire, on fera débiter l'appareil dans un circuit extérieur sans réactance. Quand on ne dispose pas d'un alternateur capable de produire la tension efficace requise, on peut se servir d'un transformateur auxiliaire pour obtenir celle-ci.

Méthode indirecte. — Pour réduire l'influence des erreurs

de mesure, on détermine le plus souvent la puissance p dissipée dans le transformateur par effet Joule, courants de Foucault et hystérésis. P désignant la puissance disponible, on calcule alors le rendement par la formule

$$\eta_1 = \frac{P}{P + p}.$$

Comme $d\eta_1/\eta_1 = -dp/(P + p)$, si p est estimé à 1 pour 100 près et équivaut à $P/20$, l'erreur sur η_1 n'atteint ainsi que 0,048 pour 100. Lorsqu'on ne demande qu'une approximation de 1 pour 100, il suffit, dans l'hypothèse précédente, d'évaluer p à 21 pour 100 près.

Il résulte de nombreuses expériences qu'à égalité de flux maximum, les pertes par hystérésis et courants de Foucault d'un transformateur à circuit magnétique fermé sont sensiblement les mêmes, quelle que soit la charge. On peut donc, pour la recherche du rendement au régime nominal, les mesurer avec le circuit secondaire ouvert, en appliquant au primaire une différence de potentiel efficace égale à la valeur de service diminuée de la chute ohmique efficace de pleine charge dans l'enroulement inducteur. Le faible déphasage entre la différence de potentiel et le courant primaires au régime susdit, dispense de faire une composition de vecteurs. L'essai est aussi possible par le secondaire, en soumettant ce dernier à sa tension normale aux bornes augmentée de la chute ohmique de pleine charge dans l'enroulement induit. La mesure s'opère avec un wattmètre convenablement choisi. La puissance indiquée par l'appareil représente les déchets par hystérésis et courants de Foucault majorés de l'effet Joule à vide. Le courant d'expérience peut être relevé au besoin, pour permettre le décompte de cette perte additionnelle, qui est d'ailleurs minime. Le contrôle du courant à vide est, du reste, utile pour constater éventuellement son intensité exagérée, qui provient parfois d'un défaut de serrage des joints du noyau. Il y a lieu de corriger l'erreur du wattmètre, qui peut être forte à cause du grand déphasage entre la tension et le courant d'essai.

La puissance perdue par effet Joule dans les deux enroule-

ments du transformateur en pleine charge se calcule d'après les intensités efficaces des courants et les résistances. Pour l'évaluation expérimentale des résistances, on a recours à une batterie secondaire, les petites variations des courants produits par les dynamos faisant intervenir une certaine réactance. Il faut attendre que le régime permanent du courant continu soit bien établi, ce qui dure souvent plus d'une minute.

On peut aussi mesurer les déchets par effet Joule, de la manière suivante, à l'aide d'un wattmètre. On met l'un des enroulements du transformateur en court-circuit sur un ampèremètre et l'on règle la différence de potentiel appliquée à l'autre de façon que l'ampèremètre marque l'intensité de pleine charge du circuit auquel il est relié. Le courant dans le second circuit présente alors également à peu près son intensité normale et la dépense d'énergie dans le fer est négligeable. Le wattmètre, raccordé à l'enroulement alimenté, renseigne, par suite, dans ces conditions, très approximativement l'effet Joule total cherché.

Méthode d'opposition. — Un artifice, que nous avons déjà rencontré dans l'étude des machines électriques rotatives, permet de déterminer, dans les conditions de pleine charge, l'ensemble des pertes par effet Joule, courants de Foucault et hystérésis d'un type de transformateur dont on possède deux spécimens. Ce moyen, employé d'abord par M. Sumpner, consiste à opposer les enroulements à fil fin des deux appareils identiques, en affaiblissant légèrement la force électromotrice induite dans l'un de ces enroulements, de manière à obtenir dans ceux-ci le courant normal. La puissance absorbée par les enroulements à gros fil, mis en dérivation par rapport à un alternateur développant la différence de potentiel de service, représente alors le total des déchets dans les deux transformateurs.

La fig. 301 montre deux transformateurs A et B, dont les enroulements à fil fin sont ainsi mis en opposition par l'intermédiaire des clefs C_1 et C_2, tandis que les enroulements à gros fil sont dérivés sur un circuit d'alimentation, avec une

résistance r sans réactance disposée à la suite de l'un d'eux. On règle r jusqu'à ce qu'un électrodynamomètre E marque le courant de pleine charge. On a alors également environ le

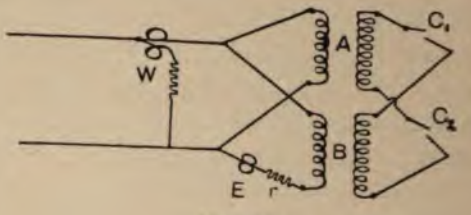


Fig. 301.

courant normal dans les enroulements à fil fin. Un wattmètre W mesure les pertes dans le système expérimenté. Si l'on déduit de la puissance qu'il indique l'effet Joule dans la résistance additionnelle, il reste les déchets dans les deux transformateurs. La moitié de la différence trouvée peut être attribuée, sans grande erreur, à chacun d'eux. Quant à la puissance transformée, elle peut être estimée en introduisant la bobine ampèremétrique du wattmètre dans les dérivations à gros fil.

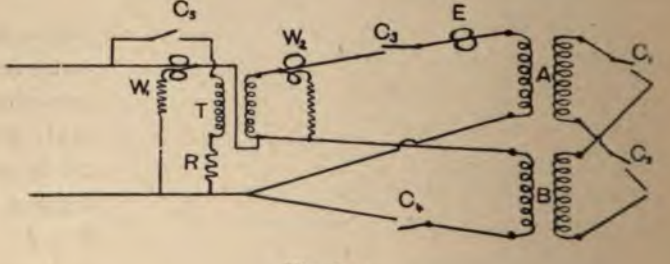


Fig. 302.

Dans le dispositif de la fig. 302, l'écart requis entre les forces électromotrices des deux transformateurs A et B est obtenu grâce à un petit transformateur auxiliaire T, dont le rapport de transformation est l'unité. Le primaire de T est branché sur les conducteurs d'alimentation avec une résistance R et une clef C_3. Son secondaire est en série avec l'enroulement à gros fil de A. Si les enroulements à gros fil des appareils étudiés

sont construits pour une tension de 100 volts, par exemple, on fait en sorte que T donne 5 à 6 volts, qui, en s'ajoutant à la différence de potentiel des fils d'alimentation ou s'en retranchant, créent dans les circuits opposés à fil fin une force électromotrice résultante capable d'y entretenir le courant de pleine charge, lorsque les clefs C_1 et C_2 sont abaissées. Le réglage s'effectue à l'aide de R, d'après les indications d'un électrodynamomètre E.

Si l'on ferme les clefs, C_3 et C_4, sans abaisser C_1, C_2 et C_5, le transformateur auxiliaire reste inactif, les enroulements à gros fil de A et B sont soumis à des différences de potentiel sensiblement égales et la puissance accusée par le wattmètre W_1 vaut approximativement les pertes à vide dans les deux transformateurs essayés.

Si l'on ferme toutes les clefs, pour faire fonctionner A et B en pleine charge, avec leurs enroulements à fil fin en opposition, la somme des indications des wattmètres W_1 et W_2, diminuée, pour plus d'exactitude, de l'effet Joule dans les fils de connexion, l'électrodynamomètre, la bobine ampèremétrique de W_2 et la bobine secondaire de T, donne les pertes totales dans les deux transformateurs examinés.

On pourrait ajouter utilement un électrodynamomètre dans le circuit à gros fil de B; toutefois la faible différence entre les courants dans les deux enroulements à gros fil n'apporte généralement pas de changement appréciable dans le résultat. P étant la moyenne des puissances transformées et p la moitié de la puissance totale dissipée par A et B, on a très sensiblement, pour le rendement de chacun de ces appareils, $\eta_1 = P/(P + p)$.

Dans le cas de transformateurs triphasés, pour vérifier si les connexions entre les enroulements à fil fin assurent l'opposition des phases correspondantes, on commence par intercaler dans les raccords des résistances appropriées comprenant des lampes à incandescence, qui ne s'allument pas quand les liaisons sont correctes.

Séparation des diverses pertes intérieures. — Plusieurs procédés se prêtent à l'estimation séparée de la perte par

hystérésis et du déchet par courants de Foucault d'un transformateur.

Un moyen graphique, employé par MM. Ryan et Merritt pour l'évaluation de la perte hystérétique, consiste à relever par points, grâce à un dispositif analogue à celui de M. Joubert, chap. XXXII, la courbe périodique de la différence de potentiel secondaire à circuit ouvert e_2 et celle du courant primaire i_1. Si l'alternateur engendrant le courant d'essai n'est pas accessible, on peut se servir d'un petit moteur synchrone pour mouvoir le contact mobile utilisé. On sait que la valeur de e_2 est numériquement égale, à chaque instant, au produit du nombre de spires induites par la variation du flux magnétique $\mathfrak{N}$ en jeu, de sorte que les longueurs des ordonnées de la courbe de tension sont proportionnelles aux coefficients angulaires des tangentes aux points correspondants de la courbe représentant le flux en fonction du temps. La phase de la courbe de $\mathfrak{N}$ est, d'ailleurs, en avance d'un quart de période sur celle de la courbe de e_2. Il est donc possible de déduire la courbe du flux de cette dernière et, en prenant les valeurs simultanées de $\mathfrak{N}$ et i_1 respectivement comme ordonnées et comme abscisses, de tracer un diagramme fermé figurant un cycle d'aimantation du noyau et dont l'aire est en rapport avec l'énergie dissipée par hystérésis en une période. En retranchant les pertes de puissance par hystérésis et par effet Joule des déchets totaux du transformateur, déterminés par l'une des méthodes indiquées à l'occasion des mesures de rendement, on peut ensuite apprécier l'importance des courants de Foucault.

Une autre façon de trouver la part de l'hystérésis et celle des courants de Foucault est le calcul de la puissance absorbée par ces derniers et la soustraction du résultat obtenu de l'ensemble des pertes dues aux deux causes. Si $\mathfrak{B}_0$ gauss est l'amplitude de l'induction magnétique dans le noyau, déduite de la force électromotrice induite maxima, e mm l'épaisseur des tôles de fer et f périodes par seconde la fréquence, le déchet par courants de Foucault vaut approximativement

$$\left(\frac{ef\mathfrak{B}_0}{2{,}5 \times 10^6}\right)^2 \text{ watts par cm}^3.$$

On peut encore distinguer la perte par hystérésis de la perte par courants de Foucault en remarquant, comme à propos des dynamos, p. 581, que la première est proportionnelle à la fréquence, tandis que la seconde varie comme le carré de celle-ci, et en observant la puissance totale perdue dans le noyau à différentes fréquences, mais dans les mêmes conditions d'induction magnétique maxima.

M. Kapp a proposé la méthode suivante pour évaluer isolément le déchet par hystérésis d'un grand transformateur. On envoie dans l'enroulement à fil fin de l'appareil, par l'intermédiaire d'un ampèremètre bien amorti et à zéro médian, le courant d'une batterie d'accumulateurs. Après avoir renversé brusquement le sens du courant, on note, à plusieurs reprises, l'intensité instantanée et le temps. Avec un noyau de fortes dimensions, dont la période variable est lente, on peut dresser ainsi la courbe de l'intensité en fonction du temps, en répétant au besoin l'expérience pour arriver à des moyennes satisfaisantes. Pendant la période variable d'un transformateur de 7 kilowatts, qui dure environ 100 secondes, une dizaine de lectures sont possibles. En faisant la différence entre les aires de signes contraires limitées par la courbe, on obtient la quantité d'électricité retirée des couples secondaires pendant le renversement. La multiplication de cette valeur par la tension aux bornes, relevée au moyen d'un voltmètre et qui demeure invariable avec des accumulateurs d'un modèle suffisant, fait connaître l'énergie consommée par le transformateur durant l'essai et, si l'on retranche de celle-ci l'énergie prise par l'effet Joule dans l'enroulement, il reste sensiblement la perte par hystérésis correspondant à un demi-cycle.

Facteur de puissance. — De même qu'il est important de déterminer les pertes à vide d'un transformateur, qui constituent une dépense inutile pendant les heures de fonctionnement à circuit secondaire ouvert, il convient de mesurer le facteur de puissance, c'est à dire le rapport des watts réels aux watts apparents absorbés par le primaire. Plus ce facteur est faible, plus l'intensité du courant inducteur est considérable, pour une même tension de service et une puissance donnée à

transformer, et plus est grande, par conséquent, la perte par effet Joule dans les conducteurs d'alimentation venant des machines génératrices.

Le facteur de puissance des bons transformateurs atteint déjà 0,8 au dixième de la pleine charge et s'approche de l'unité pour cette dernière, quand le circuit d'utilisation est sans réactance.

On a vu au chap. XVI comment on peut évaluer les facteurs de puissance.

Renseignements pratiques.

DÉRANGEMENTS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

(NIETHAMMER.)

A. *Générateurs et moteurs à courant continu.*

NATURE DU DÉRANGEMENT	PARTICULARITÉS OBSERVÉES	CAUSES
I. — Étincelles au contact des balais et du collecteur.	1. — L'isolant est fortement attaqué entre deux lames.	Interruption d'une bobine de l'induit connectée à ces deux lames ; se produit parfois aux raccords des bobines avec le collecteur, plus rarement dans l'armature.
	2 et 2_a. — Vibration des balais ; traces de brûlure au collecteur ; avec les balais de charbon, celui-ci se noircit fortement.	Le collecteur n'est pas rond, il fouette. L'isolant dépasse les lames parce qu'il n'a pas la même dureté que celles-ci, ou bien à cause du manque de cohésion du collecteur (relâchement des bagues de serrage).
	3. — Vitesse trop grande pour la tension normale.	Excitation trop faible.
	4. — Induit mal centré, lorsqu'il s'agit d'une machine multipolaire avec enroulement en parallèle ; on constate en même temps un échauffement anormal, même si l'induit ne débite ou ne reçoit aucun courant extérieur. Le même phénomène se produit avec les induits en séries parallèles, spécialement si l'enroulement est dissymétrique.	Courants d'échange dans l'induit, provoqués par la différence des forces électromotrices développées dans les diverses bobines, par suite de l'inégalité des entrefers ou autres causes. Avec les enroulements en séries-parallèles, la cause réside dans la différence de résistance des diverses lignes de balais.
	5. — Dans le cas de machines multipolaires, une bobine inductrice s'échauffe fortement ou reste complètement froide ; en même temps, échauffement anormal de l'induit.	Une bobine inductrice présente un court-circuit extérieur ; il en résulte des inégalités entre les divers champs magnétiques et, par conséquent, des courants d'échange dans l'induit.
	6. — Sans indices spéciaux.	Position défectueuse des balais. Surcharge. Graissage défectueux du collecteur. Avec de nouveaux balais, surface de contact mal rodée

NATURE DU DÉRANGEMENT	PARTICULARITÉS OBSERVÉES	CAUSES
		Balais de mauvaise qualité. Ressorts de balais défectueux.
II. — Échauffement anormal de l'induit.	1. — Vitesse trop faible avec la tension normale.	Excitation trop forte, pertes par courants de Foucault et hystérésis exagérées.
	2. — Échauffement d'une partie de l'enroulement de l'armature après peu de minutes; une génératrice ne s'amorçant généralement pas lorsqu'elle a ce défaut, on la fait tourner à excitation séparée et sans débiter de courant; avec un moteur, on constate une vitesse de rotation trop grande.	Court-circuit d'une ou plusieurs bobines de l'armature.
	3. — Balais trop fortement comprimés sur le collecteur; éventuellement, balais trop épais.	Transport de chaleur du collecteur à l'enroulement d'induit.
	4. — Balais en matériaux mal appropriés : charbon ou toile de cuivre trop durs, etc.	Comme ci-dessus.
III. — Échauffement anormal des bobines inductrices	1. — Vitesse de rotation trop faible pour la tension normale.	Courant inducteur exagéré.
	2. — Tension trop élevée pour le nombre de tours normal.	Comme ci-dessus.
	3. — Une ou plusieurs bobines restent froides, les autres s'échauffent fortement; accident assez fréquent avec les machines compound, où il est causé par le contact entre les enroulements en série et en dérivation.	Mise en court-circuit d'une ou plusieurs bobines inductrices; augmentation du courant inducteur de l'enroulement shunt par suite de la diminution de résistance.
IV. — Pas de tension aux bornes de la dynamo.	1. — La dynamo donne toute sa tension si elle est excitée séparément.	La machine a perdu son magnétisme rémanent.
	2. — La machine donne toute sa tension si elle est excitée séparément.	La machine a subi un renversement de polarité par suite d'un court-circuit.
	3. — La machine donne sa tension entière avec excitation	L'induit n'a pas le sens de rotation qu'il avait lors de

NATURE DU DÉRANGEMENT	PARTICULARITÉS OBSERVÉES	CAUSES
	séparée, mais les pôles sont renversés.	l'essai à l'usine.
	4. — La machine ne donne pas de tension avec excitation séparée.	Enroulement inducteur interrompu ; rhéostat de champ interrompu ; bobines mal connectées opposant leurs effets.
	5. — La machine donne une tension trop faible avec excitation séparée ; elle absorbe une grande puissance et l'induit s'échauffe rapidement.	Une ou plusieurs bobines de l'induit sont en court-circuit.
	6. — La machine produit avec excitation séparée à peu près la tension normale ; fortes étincelles sans échauffement et sans notable absorption d'énergie ; l'examen montre les indices repris sous I, 1.	Voir I, 1.
	7. — La machine fournit sa pleine tension, soit avec excitation indépendante, soit en pressant très fortement les balais sur le collecteur.	Voir I, 2a. L'isolant qui dépasse empêche le contact entre le collecteur et les balais.
V. — Le moteur ne démarre pas.	1. — Le courant passe dans l'induit ; celui-ci peut être facilement mis en mouvement à la main, mais on remarque alors beaucoup d'étincelles.	Il n'y a pas de courant dans l'inducteur ; le circuit de l'enroulement shunt est interrompu, soit dans le rhéostat de démarrage, soit dans le moteur ; il est possible aussi que les bobines magnétisantes soient mal connectées et opposent leurs effets ; le moteur non chargé a alors une tendance à l'emballement.
	2. — Comme ci-dessus, mais sans interruption du courant magnétisant ni connexions défectueuses des bobines inductrices ; le moteur se met en marche à vide si on l'aide à la main et se laisse alors charger.	Connexion fautive du rhéostat de démarrage avec le moteur : le courant inducteur est dérivé, non pas avant le rhéostat, mais bien entre celui-ci et le moteur, de sorte que le champ est très faible à la mise en marche.
	3. — Le courant passe dans l'induit et dans l'inducteur ; les connexions sont exactes ; l'induit ne se laisse tourner à la main que difficilement et par chocs.	Une ou plusieurs bobines induites présentent une défectuosité, sont brûlées ou ont le diélectrique percé.

NATURE DU DÉRANGEMENT	PARTICULARITÉS OBSERVÉES	CAUSES
	4. — Il n'y a pas de courant dans l'armature.	Le rhéostat de démarrage ou les coupe-circuits sont interrompus.

B. *Générateurs et moteurs à courants alternatifs monophasés et polyphasés.*

VI. — Pas de tension aux bornes de la génératrice.	1. — Pas de tension aux bornes de l'excitatrice.	Voir IV, 1, 3-7.
	2. — L'excitatrice produit sa tension normale ; mais la génératrice ne reçoit pas de courant magnétisant.	Enroulement inducteur ou rhéostat de champ de la génératrice interrompu.
	3. — L'excitatrice fournit sa tension normale ; lorsqu'on met en circuit l'inducteur de la génératrice, un courant beaucoup trop fort traverse l'induit de l'excitatrice.	Court-circuit entre les bagues ou les câbles amenant le courant à l'inducteur de la génératrice ; une bobine inductrice est en court-circuit.
	4. — La génératrice ne donne même pas la tension correspondant au magnétisme rémanent (2 à 4 °/o de la tension normale).	Interruption dans l'enroulement de l'induit.
VII. — La génératrice ne produit pas sa tension normale.	1. — La machine ronfle fortement, une ou plusieurs bobines de l'induit s'échauffent fortement et en peu de temps.	Une ou plusieurs bobines de l'induit brûlées ou présentant un court-circuit extérieur.
	2. — Sans indices spéciaux.	Une ou plusieurs bobines de l'induit ou de l'inducteur sont mal connectées et opposent leur effet à celui des autres bobines.
VIII. — Le moteur asynchrone s'échauffe fortement.	1. — L'enroulement du stator a une température trop élevée à certains endroits et normale aux autres ; le moteur ne développe qu'un couple réduit et absorbe un courant intense.	Court-circuit dans une phase ou entre deux phases ; souvent aussi comme VII, 1.
	2. — L'armature en court-circuit s'échauffe ; le moteur ne développe qu'un couple réduit et tourne moins vite que normalement.	Mauvais contact des barres dans l'anneau qui les réunit ; les jonctions doivent être soudées et rivées.

NATURE DU DÉRANGEMENT	PARTICULARITÉS OBSERVÉES	CAUSES
	3. — Échauffement de l'enroulement du rotor d'un moteur à bagues; le moteur grogne au démarrage et se met difficilement en marche.	Comme VIII, 1.
IX. — Le moteur asynchrone ne démarre pas.	1. — Il n'y a pas de courant dans l'une des trois phases.	Interruption d'une phase.
	2. — Les courants dans les trois phases sont différents.	Connexion fautive des phases; le commencement et la fin d'une des phases sont permutés.
	3. — Sans indices spéciaux.	Défectuosité dans le démarreur.
	4. — Sans indices spéciaux.	Rotor mal centré, frotte contre le fer du stator.
	5. — Grand à-coup de courant; le moteur ronfle.	L'appareil mettant le rotor en court-circuit n'a pas été ouvert.
X. — Le moteur asynchrone ne supporte pas de surcharge.	Le moteur se décroche facilement.	Tension d'alimentation trop basse ou fausses connexions (par exemple, étoile au lieu de triangle).

Dérangements communs à toutes les machines électriques.

a) *Échauffement des paliers.* On y remédie par l'emploi d'une huile appropriée en quantité suffisante; il faut éviter l'introduction dans les paliers de toute saleté et de poussières; la courroie de transmission ne doit pas être trop tendue.

b) *Surcharge de la machine :* échauffement exagéré et étincelles au collecteur.

c) *Arrêt de la ventilation.*

d) *Écoulement d'huile* qui vient salir l'enroulement. On intercale des feuilles de papier ou de cuir dans le palier, ou l'on monte à chaud sur l'arbre des bagues de projection.

Moyens susceptibles d'améliorer le fonctionnement des machines.

Voici, à titre d'indication, quelques moyens que l'on peut employer pour améliorer le fonctionnement de machines qui laissent à désirer, sans cependant devoir être mises hors service :

a) Machines à courant continu ; étincelles au collecteur.

1) Raccourcissement de l'arc polaire ; taille oblique des cornes polaires.

2) Application de connexions équipotentielles, qui sont souvent encore plus nécessaires avec des enroulements en séries-parallèles qu'avec des bobinages en parallèle.

3) Réglage précis de la longueur d'entrefer, de la distance entre les lignes de balais et de l'écartement des pôles.

4) Adopter des dimensions ou des matériaux différents pour les balais (employer des balais durs pour la haute tension) ; laisser se roder les surfaces de frottement.

5) Aléser, ce qui permet de diminuer le décalage des balais.

b) La machine ne donne pas la tension normale. On dispose des tôles entre les pièces polaires et les noyaux inducteurs, ou entre ceux-ci et le bâti, pour diminuer l'entrefer.

c) La machine ronfle. Augmenter le rayon de courbure de la surface polaire ou couper obliquement les cornes polaires.

d) Réglage défectueux de la tension d'une machine à courants alternatifs. Aléser, ou déconnecter une ou plusieurs spires par phase ; percer des trous dans les pôles.

TABLEAU COMPARATIF DES PRINCIPALES DISPOSITI DES MACHI

	RÈGLEMENT AMÉRICAIN	RÈGLEMENT ALLEMAN
Régime de marche		Intermittent : pendant 1 heu Momentané : donné par la pl de régime. Continu : pendant 10 heures, les transformateurs jusqu tention d'une températur tionnaire. Plaque obligatoire.
Température ambiante	25° C. Pour 25° à 35° la surélévation doit être diminuée de 1/2 pour 100 par degré. Au-dessous de 25°, augmentation de 1/2 pour 100 par degré.	35° C.
Surélévation de température admise	*a*) Circuits inducteurs, induits, enroulements de transformateurs, 50° C. *b*) Circuits en cage d'écureuil ou en court-circuit, 58° C. *c*) Collecteurs, bagues, balais, 55° C. *d*) Paliers, 40° C. *e* Fer des transformateurs, 45° C.	Enroulements isolés et bag mouvement : Coton, 60° C. Papier, 60° C. Mica, 80° C. Enroulements immobiles : Coton, 60° C. Papier, 70° C. Mica, 90° C.
Durée d'essai	Jusqu'à obtention de valeur pratiquement constante pour la température. Admet une surcharge au début.	10 heures. Transformateurs, jusqu'à rature stationnaire.
Mesure de la température	Thermomètre pour les paliers, pièces polaires, etc. Augmentation de résistance pour les circuits électriques, toutes les fois que possible; en même temps thermomètre.	Génératrices à courant con Inducteur, augmentati résistance. Induit, au thermomètre Génératrices à induit fixe : Inducteur, augmentati

)IVERS RÈGLEMENTS SUR LES ESSAIS DE RÉCEPTION

s BOURGUIGNON.)

ASSOCIATION ALSACIENNE)PRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR ET ASSOCIATIONS FRANÇAISES IÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR (1904)	SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (PARIS)
35° C (maximum). écifié pour température ambiante evée.	35° C. Température moyenne pendant le dernier quart de l'essai.
rs à courant continu, 45° C. aroulements, 40° C. nents de transformateurs. 45° C. fermés sur eux-mêmes, 55° C. irs, bagues, 50° C. bornes, 30° C.	Inducteurs, 45° C. Autres circuits à courant continu, 45° C. Transformateurs, 55° C. Circuits fermés sur eux-mêmes, 60° C. Collecteurs, bagues, 55° C. Fer, 60° C. Paliers, 40° C.
$K = \frac{\text{volts-ampères}}{\text{tours}}$. K = < 5 2 heures. 5-10 3 — 10-30 4 — 30-80 5 — 80-200 6 — 200-500 7 — 500-800 8 — 800-1500 9 — > 1 500 10 — transformateurs, durée de fonction-t.	K = 0-10 2 heures. 10-30 3 — 30-100 4 — 100-200 5 — 200-300 6 — 300-500 7 — 500-700 8 — 700-1000 9 — > 1000 10 — Pour les transformateurs, durée de fonctionnement.
inducteurs à courant continu, par ntation de résistance. collecteur, par thermomètre. ircuits, par les deux procédés.	Par thermomètre sur la partie la plus chaude.

	RÈGLEMENT AMÉRICAIN	RÈGLEMENT ALLEMAND
		résistance. Induit, au thermomètre. Génératrices à induit tournan Inducteur, augmentation résistance. Induit, au thermomètre. Moteurs : Enroult^ts fixes, thermomé mobiles, résista Transformateurs, thermomèt
Surcharge (temps et valeur)	Génératrices à courant continu, 25 pour 100, 2 heures. Génératrices alternatives, 25 pour 100, 2 heures. Moteurs à courant continu, 25 pour 100, 2 heures. Moteurs à courant continu, 50 pour 100, 1 minute. Moteurs d'induction, 25 pour 100, 2 heures. Commutatrices, 50 p. 100, 1 min. Transformateurs d'éclairage, 25 pour 100, 2 heures.	25 pour 100, 1/2 heure. 40 — 3 minutes.
Isolement	Perte inférieure à 1/1000000 du courant de pleine charge; 1 megohm suffisant. si cette condition exige davantage.	Inutile d'effectuer la mesure.
Rigidité diélectrique	Kilowatts — Volts à appliquer	Volts à appliquer à chaud.
Voltages normaux :		
110	0 à 10 . . . . . 1 000 10 et au-dessus . . . 1 500	220
220	0 à 10 . . . . . 1 000 10 et au-dessus . . . 1 500	440
440	0 à 10 . . . . . 1 500 10 et au-dessus . . . 2 000	880
500	0 à 10 . . . . . 1 500 10 et au-dessus . . . 2 000	1 000
1 000	3 500	2 000
2 000	5 000	4 000
3 000	6 000	6 000
5 000	10 000	10 000
10 000	20 000	15 000
15 000	25 000	22 500
20 000	30 000	30 000
30 000	45 000	45 000

ASSOCIATION ALSACIENNE ROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR ET ASSOCIATIONS FRANÇAISES PRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR (1904)	SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (PARIS)
100 pendant 1/10 de la durée de l'essai npérature. rmateurs, 20 pour 100 pendant 1 heure um. 100 pendant 3 minutes pour tous les eils. ons : moteurs synchrones et asynchro- onophasés, maximum 20 pour 100.	20 pour 100 pendant 1/10 de la durée de l'essai de température. 30 pour 100 pendant 5 minutes.
nce en ohms égale à 2000 fois la ten- normale en volts, avec maximum de ohm.	A mesurer après l'essai en charge.

aux voltages	Volts à appliquer
3 000	2 fois la tension
5 000	8 800
0 000	16 300
5 000	24 000
0 000	31 000
0 000	45 000

ration d'une surtension d'épreuve
ite par la machine elle-même en
t vitesse, excitation, etc.

Volts à appliquer	
A chaud	A froid
3 000	2 fois la tension
5 000	7 500
10 000	16 300
15 000	24 000
20 000	31 000
30 000	45 000

	RÈGLEMENT AMÉRICAIN	RÈGLEMENT ALLEMAND
Durée de l'essai de surtension	1 minute.	1/2 heure. Pendant 5 minutes, relèvem 30 pour 100 de la tensi service ; augmentation pour 100 du nombre de (indépendamment des ess rupture).
Mesure du rendement	Puissances mécaniques mesurées à la poulie, aux engrenages, de façon à comprendre les pertes par frottements ; celles-ci sont considérées comme indépendantes de la charge. I. Machines à commutation : Pertes par 1° frottements ; 2° hystérésis et courants de Foucault ; 3° effet Joule induit ; 4° et 5° frottement et résistance de contact des balais ; 6° excitation. II. Machines synchrones : Avec le courant en phase, pertes par 1° frottements ; 2° hystérésis et Foucault ; 3° effet Joule induit ; 4° déchets dus à charge ; 5° frottement et contact sur bagues ; 6° excitation. III. Machines synchrones à collecteur : Pertes par 1° frottements ; 2° hystérésis et Foucault ; 3° effet Joule induit, qrI^2, où $q = 1{,}47$ monophasé, 0,59 triphasé, 0,39 tétraphasé, 0,27 hexaphasé ; 4° déchets dus à charge ; 5° frottement et contact sur collecteur et bagues ; 6° excitation. IV. Machines à courant redressé : Puissance absorbée et restituée, au wattmètre. V. Appareils à induction fixes : Avec tension nominale, charge,	*a*) Méthode électrique direc *b*) Méthode électrique indir *c*) Emploi d'un frein. *d*) Emploi d'une machine se comme frein. *e*) Essai à vide, en mesura différentes pertes. *f*) Moteur auxiliaire. *g*) Méthode de l'indicateur. *h*) Isolement des pertes par f ments quand les paliers n pas partie de la dynamo plage direct avec machi vapeur).

ASSOCIATION ALSACIENNE DE PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR ET ASSOCIATIONS FRANÇAISES DES PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR (1904)	SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (PARIS)
Tensions indiquées précédemment, amenées progressivement et maintenues pendant 5 minutes.	2 minutes.
Quand le procédé direct n'est pas suffisamment précis, par les pertes séparées.	Quand essai direct impossible, par pertes.

	RÈGLEMENT AMÉRICAIN	RÈGLEMENT ALLEMAND
	non inductive et fréquence normale, pertes par 1° hystérésis et Foucault ; 2° effet Joule dans enroulements ; 3° déchets dus à charge ; 4° dispositif de refroidissement. VI. Appareils à induction mobiles : Avec fréquence normale et tension sinusoïdale, puissance électrique, au wattmètre, et puissance mécanique poulie.	
Autorégulation	L'autorégulation sera mesurée par la variation maxima du potentiel, courant, vitesse, entre pleine charge et marche à vide, en pourcentage de la valeur en pleine charge.	
Tolérances		

ASSOCIATION ALSACIENNE DE PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR ET ASSOCIATIONS FRANÇAISES 3 PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR (1904)	SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (PARIS)

TABLE DES ARCS, SINUS ET TANGENTES.

DEGRÉS	ARCS	SINUS	TANGENTES	DEGRÉS	ARCS	SINUS	TANGENTES
1	0,0175	0,017	0,017	46	0,8029	0,719	1,036
2	0,0349	0,035	0,035	47	0,8203	0,731	1,073
3	0,0524	0,052	0,052	48	0,8378	0,743	1,111
4	0,0698	0,070	0,070	49	0,8552	0,755	1,151
5	0,0873	0,087	0,088	50	0,8727	0,766	1,192
6	0,1047	0,105	0,105	51	0,8901	0,777	1,236
7	0,1222	0,122	0,123	52	0,9076	0,788	1,281
8	0,1396	0,139	0,141	53	0,9250	0,799	1,328
9	0,1571	0,157	0,159	54	0,9425	0,809	1,377
10	0,1745	0,174	0,177	55	0,9599	0,819	1,429
11	0,1920	0,191	0,195	56	0,9774	0,829	1,483
12	0,2094	0,208	0,213	57	0,9948	0,839	1,541
13	0,2269	0,225	0,231	58	1,0123	0,848	1,601
14	0,2443	0,242	0,250	59	1,0297	0,857	1,665
15	0,2618	0,259	0,268	60	1,0472	0,866	1,733
16	0,2793	0,276	0,287	61	1,0647	0,875	1,805
17	0,2967	0,293	0,306	62	1,0821	0,883	1,882
18	0,3142	0,309	0,325	63	1,0996	0,891	1,964
19	0,3316	0,326	0,345	64	1,1170	0,899	2,052
20	0,3491	0,342	0,364	65	1,1345	0,906	2,146
21	0,3665	0,359	0,384	66	1,1519	0,914	2,248
22	0,3840	0,375	0,404	67	1,1694	0,921	2,358
23	0,4014	0,391	0,425	68	1,1868	0,927	2,477
24	0,4189	0,407	0,445	69	1,2043	0,934	2,607
25	0,4363	0,423	0,467	70	1,2217	0,940	2,750
26	0,4538	0,439	0,488	71	1,2392	0,946	2,907
27	0,4712	0,454	0,510	72	1,2566	0,951	3,081
28	0,4887	0,470	0,532	73	1,2741	0,956	3,274
29	0,5061	0,485	0,555	74	1,2915	0,961	3,481
30	0,5236	0,500	0,578	75	1,3090	0,966	3,736
31	0,5411	0,515	0,601	76	1,3265	0,970	4,016
32	0,5585	0,530	0,625	77	1,3439	0,974	4,337
33	0,5760	0,545	0,650	78	1,3614	0,978	4,711
34	0,5934	0,559	0,675	79	1,3788	0,982	5,152
35	0,6109	0,574	0,701	80	1,3963	0,985	5,681
36	0,6283	0,588	0,727	81	1,4137	0,988	6,326
37	0,6458	0,602	0,754	82	1,4312	0,990	7,130
38	0,6632	0,616	0,782	83	1,4486	0,992	8,164
39	0,6807	0,629	0,810	84	1,4661	0,994	9,541
40	0,6981	0,643	0,839	85	1,4835	0,996	11,468
41	0,7156	0,656	0,870	86	1,5010	0,997	14,361
42	0,7330	0,669	0,901	87	1,5184	0,998	19,188
43	0,7505	0,682	0,933	88	1,5359	0,999	28,640
44	0,7679	0,695	0,966	89	1,5533	0,999	57,290
45	0,7854	0,707	1,000	90	1,5708	1,000	∞

ASSOCIATION ALSACIENNE DE PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR ET ASSOCIATIONS FRANÇAISES DES PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR (1904)	SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (PARIS)

TABLE DES ARCS, SINUS ET TANGENTES.

DEGRÉS	ARCS	SINUS	TANGENTES	DEGRÉS	ARCS	SINUS	TANGENTES
1	0,0175	0,017	0,017	46	0,8029	0,719	1,036
2	0,0349	0,035	0,035	47	0,8203	0,731	1,073
3	0,0524	0,052	0,052	48	0,8378	0,743	1,111
4	0,0698	0,070	0,070	49	0,8552	0,755	1,151
5	0,0873	0,087	0,088	50	0,8727	0,766	1,192
6	0,1047	0,105	0,105	51	0,8901	0,777	1,236
7	0,1222	0,122	0,123	52	0,9076	0,788	1,281
8	0,1396	0,139	0,141	53	0,9250	0,799	1,328
9	0,1571	0,157	0,159	54	0,9425	0,809	1,377
10	0,1745	0,174	0,177	55	0,9599	0,819	1,429
11	0,1920	0,191	0,195	56	0,9774	0,829	1,483
12	0,2094	0,208	0,213	57	0,9948	0,839	1,541
13	0,2269	0,225	0,231	58	1,0123	0,848	1,601
14	0,2443	0,242	0,250	59	1,0297	0,857	1,665
15	0,2618	0,259	0,268	60	1,0472	0,866	1,733
16	0,2793	0,276	0,287	61	1,0647	0,875	1,805
17	0,2967	0,293	0,306	62	1,0821	0,883	1,882
18	0,3142	0,309	0,325	63	1,0996	0,891	1,964
19	0,3316	0,326	0,345	64	1,1170	0,899	2,052
20	0,3491	0,342	0,364	65	1,1345	0,906	2,146
21	0,3665	0,359	0,384	66	1,1519	0,914	2,248
22	0,3840	0,375	0,404	67	1,1694	0,921	2,358
23	0,4014	0,391	0,425	68	1,1868	0,927	2,477
24	0,4189	0,407	0,445	69	1,2043	0,934	2,607
25	0,4363	0,423	0,467	70	1,2217	0,940	2,750
26	0,4538	0,439	0,488	71	1,2392	0,946	2,907
27	0,4712	0,454	0,510	72	1,2566	0,951	3,081
28	0,4887	0,470	0,532	73	1,2741	0,956	3,274
29	0,5061	0,485	0,555	74	1,2915	0,961	3,481
30	0,5236	0,500	0,578	75	1,3090	0,966	3,736
31	0,5411	0,515	0,601	76	1,3265	0,970	4,016
32	0,5585	0,530	0,625	77	1,3439	0,974	4,337
33	0,5760	0,545	0,650	78	1,3614	0,978	4,711
34	0,5934	0,559	0,675	79	1,3788	0,982	5,152
35	0,6109	0,574	0,701	80	1,3963	0,985	5,681
36	0,6283	0,588	0,727	81	1,4137	0,988	6,326
37	0,6458	0,602	0,754	82	1,4312	0,990	7,130
38	0,6632	0,616	0,782	83	1,4486	0,992	8,164
39	0,6807	0,629	0,810	84	1,4661	0,994	9,541
40	0,6981	0,643	0,839	85	1,4835	0,996	11,468
41	0,7156	0,656	0,870	86	1,5010	0,997	14,361
42	0,7330	0,669	0,901	87	1,5184	0,998	19,188
43	0,7505	0,682	0,933	88	1,5359	0,999	28,640
44	0,7679	0,695	0,966	89	1,5533	0,999	57,290
45	0,7854	0,707	1,000	90	1,5708	1,000	∞

DE 1 MÈTRE DE FIL

de 1,6 à 60,0 microhms-cm. (GRAWINKEL ET STRECKER.)

Platine Fer					Maillechort			Nickeline Rhéotan Manganine		Diamètre
7,00	8,00	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	mm
36	41	51	76	102	127	153	204	255	306	0,05
8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76	0,10
4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	34	0,15
2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	0,20
1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	0,25
0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	0,30
0,73	0,83	1,04	1,56	2,08	2,60	3,12	4,16	5,20	6,24	0,35
0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,77	0,40
0,44	0,50	0,63	0,94	1,26	1,57	1,89	2,52	3,14	3,77	0,45
0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	0,50
0,295	0,337	0,421	0,63	0,84	1,05	1,26	1,68	2,10	2,53	0,55
0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	2,12	0,60
0,211	0,241	0,301	0,45	0,60	0,75	0,90	1,21	1,51	1,81	0,65
0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	0,70
0,158	0,181	0,226	0,34	0,45	0,57	0,68	0,91	1,13	1,36	0,75
0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	0,80
0,123	0,141	0,176	0,264	0,352	0,441	0,53	0,70	0,88	1,06	0,85
0,110	0,126	0,157	0,236	0,314	0,393	0,47	0,63	0,79	0,94	0,90
0,099	0,113	0,141	0,212	0,282	0,353	0,42	0,56	0,71	0,85	0,95
0,089	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,76	1,00
0,074	0,084	0,105	0,158	0,210	0,263	0,316	0,421	0,526	0,63	1,1
0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,53	1,2
0,053	0,060	0,075	0,113	0,151	0,188	0,226	0,301	0,377	0,45	1,3
0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,39	1,4
0,040	0,045	0,057	0,085	0,113	0,141	0,170	0,226	0,283	0,34	1,5
0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	1,6
0,0308	0,0352	0,0441	0,066	0,088	0,110	0,132	0,176	0,220	0,264	1,7
0,0275	0,0314	0,0393	0,059	0,079	0,098	0,118	0,157	0,196	0,236	1,8
0,0247	0,0282	0,0353	0,053	0,071	0,088	0,106	0,141	0,176	0,212	1,9
0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	2,0
0,0184	0,0210	0,0263	0,0395	0,0526	0,066	0,079	0,105	0,132	0,158	2,2
0,0155	0,0177	0,0221	0,0332	0,0442	0,055	0,066	0,088	0,111	0,133	2,4
0,0132	0,0151	0,0188	0,0283	0,0377	0,047	0,057	0,075	0,094	0,113	2,6
0,0114	0,0130	0,0162	0,0244	0,0325	0,041	0,049	0,065	0,081	0,097	2,8
0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	3,0
0,0087	0,0100	0,0124	0,0187	0,0249	0,0311	0,0373	0,0497	0,062	0,075	3,2
0,0077	0,0088	0,0110	0,0165	0,0220	0,0275	0,0330	0,0441	0,055	0,066	3,4
0,0069	0,0079	0,0098	0,0147	0,0196	0,0246	0,0295	0,0393	0,049	0,059	3,6
0,0062	0,0071	0,0088	0,0133	0,0177	0,0221	0,0265	0,0353	0,044	0,053	3,8
0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	4,0

RÉSISTANCE EN OHMS

Pour des diamètres de 0,05 à 4,0 mm et des résistivités

Diamètre	Cuivre			Bronze						
mm	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00
0,05	8,14	8,65	9,16	9,67	10,19	12,73	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,08	1,13	1,41	1,70	2,26	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,424	0,566	0,707	0,849
0,35	0,166	0,177	0,187	0,198	0,208	0,260	0,312	0,416	0,520	0,624
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,239	0,318	0,398	0,477
0,45	0,101	0,107	0,113	0,120	0,126	0,157	0,189	0,252	0,314	0,377
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,153	0,204	0,255	0,306
0,55	0,067	0,072	0,076	0,080	0,084	0,105	0,126	0,168	0,210	0,253
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,106	0,141	0,177	0,212
0,65	0,048	0,051	0,054	0,057	0,060	0,075	0,090	0,120	0,151	0,181
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,156
0,75	0,036	0,038	0,041	0,043	0,045	0,057	0,068	0,091	0,113	0,136
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,060	0,080	0,099	0,119
0,85	0,0282	0,0299	0,0317	0,0335	0,0352	0,0441	0,053	0,070	0,088	0,106
0,90	0,0251	0,0267	0,0283	0,0299	0,0314	0,0393	0,047	0,063	0,079	0,094
0,95	0,0226	0,0240	0,0254	0,0268	0,0282	0,0353	0,042	0,056	0,071	0,085
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,038	0,051	0,064	0,076
1,1	0,0168	0,0179	0,0190	0,0200	0,0210	0,0263	0,0316	0,0421	0,0526	0,063
1,2	0,0141	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,3	0,0121	0,0128	0,0136	0,0143	0,0151	0,0188	0,0226	0,0301	0,0377	0,045
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0195	0,0260	0,0325	0,039
1,5	0,0091	0,0096	0,0102	0,0108	0,0113	0,0141	0,0170	0,0226	0,0283	0,034
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0149	0,0199	0,0249	0,0298
1,7	0,0071	0,0075	0,0079	0,0084	0,0088	0,0110	0,0132	0,0176	0,0220	0,0264
1,8	0,0063	0,0067	0,0071	0,0075	0,0079	0,0098	0,0118	0,0157	0,0196	0,0236
1,9	0,0056	0,0060	0,0064	0,0067	0,0071	0,0088	0,0106	0,0141	0,0176	0,0212
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
2,2	0,00421	0,00447	0,00473	0,00500	0,00526	0,0066	0,0079	0,0105	0,0132	0,0158
2,4	0,00354	0,00376	0,00398	0,00420	0,00442	0,0055	0,0066	0,0088	0,0111	0,0133
2,6	0,00301	0,00320	0,00339	0,00358	0,00377	0,0047	0,0057	0,0075	0,0094	0,0113
2,8	0,00260	0,00274	0,00292	0,00308	0,00325	0,0041	0,0049	0,0065	0,0081	0,0097
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,2	0,00199	0,00211	0,00224	0,00236	0,00249	0,00311	0,00373	0,00497	0,0062	0,0075
3,4	0,00176	0,00187	0,00198	0,00209	0,00220	0,00275	0,00330	0,00441	0,0055	0,0066
3,6	0,00157	0,00167	0,00177	0,00187	0,00196	0,00246	0,00295	0,00393	0,0049	0,0059
3,8	0,00141	0,00150	0,00159	0,00168	0,00177	0,00221	0,00265	0,00353	0,0044	0,0053
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048

DE 1 MÈTRE DE FIL

de 1,6 à 60,0 microhms-cm. (GRAWINKEL ET STRECKER.)

Platine Fer				Maillechort			Nickeline Rhéotan Manganine		Diamètre
7,00	8,00	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	mm
36	41	51	76	102	127	153	204	255	306	0,05
8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76	0,10
4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	34	0,15
2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	0,20
1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	0,25
0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	0,30
0,73	0,83	1,04	1,56	2,08	2,60	3,12	4,16	5,20	6,24	0,35
0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,77	0,40
0,44	0,50	0,63	0,94	1,26	1,57	1,89	2,52	3,14	3,77	0,45
0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	0,50
0,295	0,337	0,421	0,63	0,84	1,05	1,26	1,68	2,10	2,53	0,55
0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	2,12	0,60
0,211	0,241	0,301	0,45	0,60	0,75	0,90	1,21	1,51	1,81	0,65
0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	0,70
0,158	0,181	0,226	0,34	0,45	0,57	0,68	0,91	1,13	1,36	0,75
0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	0,80
0,123	0,141	0,176	0,264	0,352	0,441	0,53	0,70	0,88	1,06	0,85
0,110	0,126	0,157	0,236	0,314	0,393	0,47	0,63	0,79	0,94	0,90
0,099	0,113	0,141	0,212	0,282	0,353	0,42	0,56	0,71	0,85	0,95
0,089	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,76	1,00
0,074	0,084	0,105	0,158	0,210	0,263	0,316	0,421	0,526	0,63	1,1
0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,53	1,2
0,053	0,060	0,075	0,113	0,151	0,188	0,226	0,301	0,377	0,45	1,3
0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,39	1,4
0,040	0,045	0,057	0,085	0,113	0,141	0,170	0,226	0,283	0,34	1,5
0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	1,6
0,0308	0,0352	0,0441	0,066	0,088	0,110	0,132	0,176	0,220	0,264	1,7
0,0275	0,0314	0,0393	0,059	0,079	0,098	0,118	0,157	0,196	0,236	1,8
0,0247	0,0282	0,0353	0,053	0,071	0,088	0,106	0,141	0,176	0,212	1,9
0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	2,0
0,0184	0,0210	0,0263	0,0395	0,0526	0,066	0,079	0,105	0,132	0,158	2,2
0,0155	0,0177	0,0221	0,0332	0,0442	0,055	0,066	0,088	0,111	0,133	2,4
0,0132	0,0151	0,0188	0,0283	0,0377	0,047	0,057	0,075	0,094	0,113	2,6
0,0114	0,0130	0,0162	0,0244	0,0325	0,041	0,049	0,065	0,081	0,097	2,8
0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	3,0
0,0087	0,0100	0,0124	0,0187	0,0249	0,0311	0,0373	0,0497	0,062	0,075	3,2
0,0077	0,0088	0,0110	0,0165	0,0220	0,0275	0,0330	0,0441	0,055	0,066	3,4
0,0069	0,0079	0,0098	0,0147	0,0196	0,0246	0,0295	0,0393	0,049	0,059	3,6
0,0062	0,0071	0,0088	0,0133	0,0177	0,0221	0,0265	0,0353	0,044	0,053	3,8
0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	4,0

La résistance d'un fil de cuivre commercial étant r ohms, pour une élévation de température de t° C la résistance devient r + 0,0037 rt. La table ci-dessous donne les produits 0,0037 rt.

(GRAWINKEL ET STRECKER.)

r ohms	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
2	0,015	0,030	0,044	0,059	0,074	0,089	0,104	0,118	0,133	0,148	0,163	0,178	0,192	0,207	0,222
4	0,030	0,059	0,089	0,118	0,148	0,178	0,207	0,237	0,266	0,296	0,326	0,355	0,385	0,414	0,444
6	0,044	0,089	0,133	0,178	0,222	0,266	0,311	0,355	0,400	0,444	0,488	0,533	0,577	0,622	0,666
8	0,059	0,118	0,178	0,237	0,296	0,355	0,414	0,474	0,533	0,592	0,651	0,710	0,770	0,829	0,888
10	0,074	0,148	0,222	0,296	0,370	0,444	0,518	0,592	0,666	0,740	0,814	0,888	0,962	1,036	1,110
12	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	0,98	1,07	1,15	1,24	1,33
14	0,10	0,21	0,31	0,41	0,52	0,62	0,73	0,83	0,93	1,04	1,14	1,24	1,35	1,45	1,55
16	0,12	0,24	0,36	0,47	0,59	0,71	0,83	0,95	1,07	1,18	1,30	1,42	1,54	1,66	1,78
18	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93	1,07	1,20	1,33	1,47	1,60	1,73	1,86	2,00
20	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,18	1,33	1,48	1,63	1,78	1,92	2,07	2,22
22	0,16	0,33	0,49	0,65	0,81	0,98	1,14	1,30	1,47	1,63	1,79	1,95	2,12	2,28	2,44
24	0,18	0,36	0,53	0,71	0,89	1,07	1,24	1,42	1,60	1,78	1,95	2,13	2,31	2,49	2,66
26	0,19	0,38	0,58	0,77	0,96	1,15	1,35	1,54	1,73	1,92	2,12	2,31	2,50	2,69	2,89
28	0,21	0,41	0,62	0,83	1,04	1,24	1,45	1,66	1,86	2,07	2,28	2,49	2,69	2,90	3,11
30	0,22	0,44	0,67	0,89	1,11	1,33	1,55	1,78	2,00	2,22	2,44	2,66	2,89	3,11	3,33
35	0,26	0,52	0,78	1,04	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,4	3,6	3,9
40	0,30	0,59	0,89	1,18	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,1	4,4
45	0,33	0,67	1,00	1,33	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0
50	0,37	0,74	1,11	1,48	1,8	2,2	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,4	4,8	5,2	5,5
55	0,41	0,81	1,22	1,63	2,0	2,4	2,8	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7	6,1
60	0,44	0,89	1,33	1,78	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,4	4,9	5,3	5,8	6,2	6,7
65	0,48	0,97	1,44	1,93	2,4	2,9	3,4	3,9	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,2
70	0,52	1,04	1,55	2,07	2,6	3,1	3,6	4,1	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7,3	7,8
75	0,55	1,11	1,66	2,22	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,5	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3
80	0,59	1,18	1,78	2,37	3,0	3,6	4,1	4,7	5,3	5,9	6,5	7,1	7,7	8,3	8,9
85	0,63	1,26	1,89	2,52	3,1	3,8	4,4	5,0	5,7	6,3	6,9	7,5	8,2	8,8	9,4
90	0,67	1,33	2,00	2,66	3,3	4,0	4,7	5,3	6,0	6,7	7,3	8,0	8,7	9,3	1,00
95	0,70	1,41	2,11	2,81	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	1,06
100	0,74	1,48	2,22	2,96	3,7	4,4	5,2	5,9	6,7	7,4	8,1	8,9	9,6	10,4	1,11

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

(TRÖTSCH KOHLR.)

ÉLECTROLYTE	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution	Poids spécifique	Résistance en ohms de 1 dcm^3	Diminution de résistance par degré centigrade en pour 100
K Cl . . . . . 18°	2,4	1,0135	2,91	2,19
—	5,0	1,0308	1,463	2,02
—	8,0	1,0519	0,820	2,00
—	10	1,0638	0,742	1,89
—	15	1,0978	0,499	1,80
—	19,3	1,1308	0,383	1,71
—	20	1,1335	0,377	1,69
—	25	1,1408	0,359	1,67
NH^4 Cl . . . . . 18°	4,76	1,0118	1,159	2,09
—	5	1,0142	1,098	1,99
—	10	1,0289	0,568	1,87
—	15	1,0430	0,390	1,72
—	19,9	1,0553	0,307	1,66
—	20	1,0571	0,299	1,62
—	25	1,0710	0,250	1,55
Na Cl . . . . . 18°	5	1,0345	1,502	2,18
—	10	1,0707	0,833	2,15
—	15	1,1087	0,615	2,13
—	20	1,1477	0,515	2,17
—	25	1,1898	0,472	2,28
—	26	1,1982	0,469	2,31
—	26,4	1,2014	0,468	2,34
Ca Cl^2 . . . . . 18°	5	1,0409	1,569	2,14
—	10	1,0852	0,884	2,07
—	15	1,1311	0,670	2,03
—	20	1,1794	0,583	2,01
—	25	1,2305	0,566	2,05
—	30	1,2841	0,608	2,17
—	35	1,3420	0,738	2,37
Cu Cl^2 . . . . . 18°	1,35	1,0123	5,82	2,29
—	9	1,0828	1,40	2,00
—	18,2	1,1985	0,97	1,94
—	28,75	1,3443	1,12	2,26
—	35	1,4518	1,44	2,70
K NO^3 . . . . . 18°	5	1,0305	2,214	2,09
—	10	1,0632	1,200	2,06
—	15	1,097	0,848	2,03
—	20	1,133	0,668	1,98
—	22	1,148	0,619	1,95
Na NO^3 . . . . . 18°	5	1,0327	2,312	2,22
—	10	1,0681	1,288	2,19
—	20	1,1435	0,773	2,16
—	30	1,2278	0,628	2,21

ÉLECTROLYTE	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution	Poids spécifique	Résistance en ohms de 1 dcm³	Diminution de résistance par degré centigrade en pour 100
$AgNO^3$ . . . . . 18°	5	1,0422	3.947	2,19
—	15	1,1404	1,478	2,16
—	25	1,2555	0,953	2,11
—	35	1,3945	0,717	2,08
—	45	1,5705	0,588	2,05
—	55	1,7895	0,509	2,07
—	60	1,9158	0,408	2,10
Na^2SO^4. . . . . 15°	5	1,0450	2,46	2,37
—	10	1,0915	1,46	2,50
—	15	1,1426	1,13	2,57
$MgSO^4$. . . . . 15°	5	1,0510	3,81	2,27
—	10	1,1652	2,43	2,42
—	15	1,1602	2,09	2,53
—	20	1,2200	2,11	2,70
—	25	1,2861	2,42	2,90
$ZnSO^4$ . . . . . 18°	5	1,0509	5,27	2,26
—	10	1,1069	3,13	2,24
—	15	1,1675	2,42	2,29
—	20	1,2323	2,14	2,42
—	25	1,3045	2,09	2,59
—	30	1,3788	2,26	2,74
$CuSO^4$ . . . . . 18°	2,5	1,0246	9,24	2,14
—	5	1,0513	5,32	2,17
—	10	1,1073	3,14	2,19
—	15	1,675	2,38	2,32
—	17,5	1,2003	2,19	2,37
$FeSO^4$ . . . . . 18°	0,37	1,0344	6,50	2,18
—	4,9	1,0476	5,03	2,17
—	7,9	1,0692	3,844	2,18
—	13,3	1,1375	2,575	2,23
—	18,9	1,2018	2,180	2,31
K^2CO^3 . . . . . 15°	5	1,0449	1,79	2,22
—	10	1,0919	0,967	2,13
—	20	1,1920	0,569	2,11
—	30	1,3002	0,452	2,20
—	40	1,4170	0,463	2,47
—	50	1,5728	0,864	3,20
Na^2CO^3 . . . . . 18°	5	1,0511	2,23	2,53
—	10	1,1044	1,43	2,72
—	15	1,1590	1,20	2,95
KOH . . . . . 15°	4,2	1,0382	0,685	1,88
—	12,6	1,1177	0,267	1,89
—	21,6	1,2088	0,197	2,00
—	29,4	1,2908	0,185	2,22
—	37,8	1,3803	0,210	2,58

ÉLECTROLYTE	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution	Poids spécifique	Résistance en ohms de 1 dcm^3	Diminution de résistance par degré centigrade en pour 100
$NaOH$ . . . . . 15°	2,5	1,0280	0,924	1.95
—	5	1,0568	0,510	2,02
—	10	1,1131	0,321	2,18
—	20	1,2262	0,307	3,01
—	30	1,3374	0,497	4,50
—	40	1,4421	0,866	6,52
H^2SO^4 . . . . . 18°	2,5	1,0161	0,924	1.15
—	5	1,0331	0,482	1.21
—	10	1,0673	0,257	1,28
—	20	1,1414	0,154	1.45
—	30	1,2207	0,136	1,62
—	50	1,3984	0,186	1.93
—	70	1,6146	0,467	2.56
—	90	1,8167	0,938	3,20
HCl . . . . . 10°	5	1,0242	0,255	1,59
—	10	1,0490	0,159	1,57
—	15	1.0744	0,135	1,56
—	20	1.1001	0,132	1,55
—	25	1,1262	0,139	1,54
—	30	1,1524	0,152	1.53
—	35	1,1775	0,170	1,52
—	40	1,2007	0,195	—
$H^2C^4HO^4$ . . . . . 18°	5	1,0216	16,8	1.86
—	10	1.0454	12,3	1,91
—	20	1,0950	10,1	1,87
—	30	1,1484	10,4	2,00
—	40	1,2064	12,8	2,23
—	50	1,2672	18,9	2.65
CH^3CO^2H . . . . . 18°	5	1.0058	82	1.63
—	10	1,0133	66	1.69
—	20	1,0257	62	1,79
—	30	1,0393	71	1,86

ÉLECTROLYTE	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution	Poids spécifique	Résistance en ohms de 1 dcm³	Diminution de résistance par degré centigrade en pour 100
$AgNO^3$ . . . . . 18°	5	1,0422	3,947	2,19
—	15	1,1404	1,478	2,16
—	25	1,2555	0,953	2,11
—	35	1,3945	0,717	2,08
—	45	1,5705	0,588	2,05
—	55	1,7895	0,509	2,07
—	60	1,9158	0,408	2,10
Na^2SO^4. . . . . 15°	5	1,0450	2,46	2,37
—	10	1,0915	1,46	2,50
—	15	1,1426	1,13	2,57
$MgSO^4$. . . . . 15°	5	1,0510	3,81	2,27
—	10	1,1652	2,43	2,42
—	15	1,1602	2,09	2,53
—	20	1,2200	2,11	2,70
—	25	1,2861	2,42	2,90
$ZnSO^4$ . . . . . 18°	5	1,0509	5,27	2,26
—	10	1,1069	3,13	2,24
—	15	1,1675	2,42	2,29
—	20	1,2323	2,14	2,42
—	25	1,3045	2,09	2,59
—	30	1,3788	2,26	2,74
$CuSO^4$ . . . . . 18°	2,5	1,0246	9,24	2,14
—	5	1,0513	5,32	2,17
—	10	1,1073	3,14	2,19
—	15	1,675	2,38	2,32
—	17,5	1,2003	2,19	2,37
$FeSO^4$ . . . . . 18°	0,37	1,0344	6,50	2,18
—	4,9	1,0476	5,03	2,17
—	7,9	1,0692	3,844	2,18
—	13,3	1,1375	2,575	2,23
—	18,9	1,2018	2,180	2,31
K^2CO^3 . . . . . 15°	5	1,0449	1,79	2,22
—	10	1,0919	0,967	2,13
—	20	1,1920	0,569	2,11
—	30	1,3002	0,452	2,20
—	40	1,4170	0,463	2,47
—	50	1,5728	0,864	3,20
Na^2CO^3 . . . . . 18°	5	1,0511	2,23	2,53
—	10	1,1044	1,43	2,72
—	15	1,1590	1,20	2,95
KOH . . . . . 15°	4,2	1,0382	0,685	1,88
—	12,6	1,1177	0,267	1,89
—	21,6	1,2088	0,197	2,00
—	29,4	1,2908	0,185	2,22
—	37,8	1,3803	0,210	2,58

ÉLECTROLYTE	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution	Poids spécifique	Résistance en ohms de 1 dcm^3	Diminution de résistance par degré centigrade en pour 100
Na OH . . . . . 15°	2,5	1,0280	0,924	1,95
—	5	1,0568	0,510	2,02
—	10	1,1131	0,321	2,18
—	20	1,2262	0,307	3,01
—	30	1,3374	0,497	4,50
—	40	1,4421	0,866	6,52
$H^2 SO^4$ . . . . . 18°	2,5	1,0161	0,924	1,15
—	5	1,0331	0,482	1,21
—	10	1,0673	0,257	1,28
—	20	1,1414	0,154	1,45
—	30	1,2207	0,136	1,62
—	50	1,3984	0,186	1,93
—	70	1,6146	0,467	2,56
—	90	1,8167	0,938	3,20
H Cl . . . . . 10°	5	1,0242	0,255	1,59
—	10	1,0490	0,159	1,57
—	15	1,0744	0,135	1,56
—	20	1,1001	0,132	1,55
—	25	1,1262	0,139	1,54
—	30	1,1524	0,152	1,53
—	35	1,1775	0,170	1,52
—	40	1,2007	0,195	—
$H^2 C^4 HO^4$ . . . . . 18°	5	1,0216	16,8	1,86
—	10	1,0454	12,3	1,91
—	20	1,0950	10,1	1,87
—	30	1,1484	10,4	2,00
—	40	1,2064	12,8	2,23
—	50	1,2672	18,9	2,65
$CH^3 CO^2 H$ . . . . . 18°	5	1,0058	82	1,63
—	10	1,0133	66	1,69
—	20	1,0257	62	1,79
—	30	1,0393	71	1,86

Valeurs de la force magnétisante $\mathcal{H}$ dans la période descendante et dans la période ascendante du magnétisme pour divers métaux employés dans les dynamos.

(GRAWINKEL et STRECKER.)

$\mathcal{B}$	FER DE SUÈDE		FER FORGÉ		FER FONDU		ACIERS POUR DYNAMOS							
							1		2		3		4	
	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
0	— 1,1	+ 1,3	— 2,9	+ 2,9	— 2,4	+ 2,2	— 1,6	+ 1,8	— 1,4	+ 1,7	— 2,0	+ 2,0	— 1,8	+ 1,8
5000	0,8	1,8	1,9	4,3	1,6	3,1	1,0	2,5	0,9	2,4	1,0	3,0	1,1	2,9
6000	0,6	2,0	1,5	5,0	1,2	3,5	0,7	2,8	0,6	2,8	0,8	3,5	0,9	3,4
7000	0,4	2,2	1,1	5,5	1,0	3,8	0,5	3,1	0,2	3,1	0,6	4,0	0,6	3,9
8000	0,2	2,5	0,7	6,4	0,6	4,2	0,2	3,5	+ 0,2	3,5	0,3	4,5	+ 0,1	4,5
9000	0	2,7	0,1	7,5	0	4,9	+ 0,1	4,2	0,5	4,0	0	5,1	0,6	5,5
10000	+ 0,2	3,2	+ 0,7	8,8	+ 0,8	5,6	0,5	5,1	1,2	4,9	+ 0,4	6,2	1,2	6,4
11000	0,9	4,2	1,8	10,4	1,8	6,8	1,1	6,2	2,1	6,0	1,0	7,3	2,6	8,1
12000	1,9	5,5	3,5	12,8	3,0	8,2	1,9	8,0	3,2	7,8	2,0	9,0	3,9	10,3
13000	3,6	7,8	5,9	16,5	4,6	10,5	3,1	10,7	4,9	10,6	3,5	11,5	6,0	13,4
14000	8,0	13,5	10,8	22,4	7,2	13,9	6,5	15,2	8,2	15,1	6,2	16,2	9,7	18,2
15000	21,9	26,1	24,6	35,4	12,1	20,3	15,3	24,2	17,0	24,5	13,5	24,2	18,0	26,6
16000	54,5	57,5	54,2	61,0	26,7	34,0	37,5	43,5	41,5	46,0	33,0	38.7	40,0	46,0
17000	100,0	100	105,0	105	58,5	63,0	75	77,0	82,0	83,0	80,0	80,0	80,0	85,0

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES FERS ET ACIERS. (J. HOPKINSON.)

NATURE DE L'ÉCHANTILLON	TREMPE	ANALYSE CHIMIQUE						Résistance spécifique en micro-ohms-cm	Induction maxima	Induction résiduelle	Énergie dissipée en ergs par cm³
		Carbone total	Manganèse	Soufre	Silicium	Phosphore	Divers				
Fer forgé.	Recuit.	»	»	»	»	»	»	13,78	18 251	7 248	13 356
Fonte malléable.	—	»	»	»	»	»	»	32,54	12 408	7 479	34 742
Fonte grise.	»	»	»	»	»	»	»	105,60	10 783	3 028	13 037
Acier Bessemer doux.	»	0,045	0,200	0,030	0	0,046	»	10,50	18 196	7 860	17 137
Acier Whitworth doux.	Recuit.	0,090	0,153	0,016	0	0,042	»	10,80	19 840	7 080	10 289
—	—	0,320	0,438	0,017	0,042	0,035	»	14,46	18 736	9 840	40 120
—	Trempé à l'huile.	0,320	0,438	0,017	0,042	0,035	»	13,90	18 796	11 040	65 786
—	Recuit.	0,890	0,165	0,005	0,081	0,019	»	15,59	16 120	10 740	42 366
—	Trempé à l'huile.	0,890	0,165	0,005	0,081	0,019	»	16,95	16 120	8 736	99 401
Acier manganésifère.	Forgé.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	53,68	4 623	2 202	34 567
—	Recuit.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	39,28	10 578	5 848	113 963
—	Trempé à l'huile.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	50,56	4 769	2 158	41 941
—	Forgé.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	69,93	747	»	»
—	Recuit.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	63,16	1 985	540	15 474
—	Trempé à l'huile.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	70,66	733	»	»
Acier silicié.	Forgé.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,63	15 148	11 073	45 740
—	Recuit.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,85	14 701	8 149	36 485
—	Trempé à l'huile.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,95	14 696	8 084	59 619
							Chrome				
Acier chromé.	Forgé.	0,532	0,393	0,020	0,220	0,041	0,621	20,16	15 778	9 318	61 439
—	Recuit.	0,532	0,393	0,020	0,220	0,041	0,621	19,42	14 848	7 570	42 425
—	Trempé à l'huile.	0,532	0,393	0,020	0,220	0,041	0,621	27,08	13 900	8 595	169 455
—	Forgé.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	17,91	14 680	7 568	85 944
—	Recuit.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	18,49	13 233	6 489	64 842
—	Trempé à l'huile.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	30,35	12 868	7 891	167 050
							Tungstène				
Acier au tungstène.	Forgé.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,49	15 718	10 144	78 568
—	Recuit.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,50	16 498	11 008	80 315
—	Trempé à l'eau froide.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,74	»	»	»
—	— tiède.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,49	15 610	9 482	149 500
—	— à l'huile.	0,511	0,625	0	0,021	0,028	3,444	36,04	14 480	8 643	216 864
—	— dur.	0,855	0,312	»	0,151	0,089	2,353	44,27	12 133	6 818	197 660
							Graphite				
Fonte grise.	»	3,455	0,173	0,042	2,044	0,151	2,064	114,00	9 148	3 161	39 789
Fonte truitée.	»	2,581	0,610	0,105	1,476	0,435	1,477	62,86	10 546	5 108	41 072
Fonte blanche.	»	2,036	0,380	0,467	0,764	0,458	0	54,61	9 342	5 554	36 383
Spiegeleisen.	»	4,510	7,970	traces	0,502	0,128	»	105,20	385	77	»

TABLEAU DE CONVERSION DES UNITÉS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES EN UNITÉS MÉTRIQUES ET C. G. S. (HOSPITALIER.)

Règle d'emploi. — *Pour transformer l'expression de la valeur numérique d'une grandeur, exprimée dans l'une des unités inscrites dans la colonne* **A**, *dans l'une des unités inscrites dans la colonne* **C**, *il faut multiplier cette valeur numérique par le facteur correspondant de la colonne* **B**.

Exemple : 10 *acres* = 10 . 4046,71 = 40467,1 mètres carrés.

Les unités de mesure étrangères sont indiquées en italiques dans le tableau avec les noms qu'elles portent dans leurs pays respectifs.

A	B	C
1 **A***bassis* (Perse)	41	centimes.
1 *acre* (Angleterre) . . .	4 046,71	m^2.
1 ampère	0,1	unité C. G. S. de courant.
1 ampère-heure.	3 600	coulombs.
1 ampère-tour	1,256	gilbert ou unité C. G. S. de force magnétomotrice.
1 *archine* (Russie)	71,119	cm.
1 — (Turquie) . . .	75,774	cm.
1 année civile	365,242	jours solaires moyens.
1 —	8 765	heures, 48 min, 49,7 sec.
1 —	31 556 929,7	secondes.
1 année sidérale	365,256	jours solaires moyens.
1 atmosphère	1,0333	kg : cm^2.
1 —	1,0136	barie.
1 **B***anabat* (Perse) . . .	1,04	franc.
1 *bani* (Roumanie) . . .	1	centime.
1 barie (ou barad) . . .	1	mégadyne : cm^2.
1 *berkowetz* (Russie) . . .	163,1	kilogrammes.
1 *bolivar* (Vénézuela) . .	1	franc.
1 *board of trade unit* (B. T. U.) (Angleterre) . . .	1	kilowatt-heure.
1 bougie décimale . . .	0,1	bec Carcel.
1 — . . .	0,05	étalon Violle.
1 *bushell* (8 gallons) (Angleterre).	36,3477	litres.

A	B	C
1 **C**alorie (kg-d)	425	kilogrammètres.
1 —	4 170	joules.
1 —	1,158	watt-heure.
1 calorie (kg-d) par seconde	4 170	watts.
1 — — .	5,77	chevaux.
1 *candle* (Angleterre) . . .	1,05	bougie décimale.
1 *candle-foot* — . . .	10,7	bougies à 1 mètre.
1 carat	205,5	milligrammes.
1 *cent* (Etats-Unis) . . .	5,18	centimes.
1 *cent* (Pays-Bas)	2,1	centimes.
1 *cent per mile* (Etats-Unis)	3,24	centimes par kilomètre.
1 — *per pound*	11,5	centimes par kilogramme.
1 centimètre de mercure .	0,0136	kg : cm^2.
76 centimètres de mercure.	1	atmosphère.
75 — — .	1	barie.
1 *chain* (22 yards) (Angleterre)	20,11644	mètres.
1 *chaldron* (12 sacks) (Angleterre)	13,08516	hectolitres.
1 cheval-heure	270 000	kilogrammètres.
1 —	635,3	calories (kg-d).
1 cheval (vapeur) . . .	75	kgm : s.
1 — . . .	7 360	meg-ergs : s.
1 — . . .	736	watts.
1 circonférence	6,2832	radians.
1 *circular mil*	0,0005067	millimètre-carré.
1 coulomb	0,1	unité C. G. S. de quantité.
1 *couronne* (Autriche) . .	1,05	franc.
1 *cubic-inch* (Angleterre) .	16,387	cm^3.
1 *cubic-foot* — .	28,316	dm^3.
1 — *per pound* (Angleterre).	61,5	dm^3 par kg.
1 *cubic-yard*	0,7645	m^3.
1 *cwt* (Hundredweight) . .	50,8	kg.
1 **D**egré	0,01745	radian.
1 *dinar* (Serbie)	1	franc.
1 *dime* (Etats-Unis) . . .	51,8	centimes.
1 *dollar* — . . .	5,1825	francs.
1 — *per pound*	11,4	francs par kilogramme.
1 *drachma* (avoirdupois). .	1,7818	gramme.
1 *drachme* (Grèce) . . .	1	franc.
1 *dram* (avoirdupois) . . .	1,7719	gramme.
1 dyne	1,01937	milligramme.
1 —	1	unité C. G. S. de force.
1 — seconde	1	unité C. G. S. de quantité de mouvement.
1 **E***l* (Hollande)	1	mètre.
1 *endazé* (Turquie) . . .	68	mètres.

A	B	C
1 ohm	10^9	unités C. G. S. de résistance.
1 — B. A.	104,87	cm de mercure.
1 — international . . .	106,3	cm de mercure.
1 — légal	106,0	cm de mercure.
1 — B. A.	0,98655	ohm international.
1 — légal	0,9972	ohm international.
1 — -centimètre. . . .	10^9	unités C. G. S. de résistivité.
1 ohm *per yard*	1,0936	ohm : m.
1 — *per mile*.	0,62138	ohm : km.
1 *ore* (Scandinavie) . . .	1,3888	centimes.
1 *ounce* (avoirdupois) . .	28,3494	grammes.
1 — (troy)	31,1035	grammes.
1 **P***ara* (Serbie).	1	centime.
1 *peck* (2 gallons) (Anglet.)	9,0869	litres.
1 *penny* (Angleterre) . . .	10,5	centimes.
1 *penny per mile*.	6,56	centimes par km.
1 — *per pound*.	23	centimes par kg.
1 *pennyweight* (troy) . . .	1,5552	gramme.
1 *peseta* (Espagne). . . .	1	franc.
1 *peso* (Chili)	5	francs.
1 *peso* (Mexique).	5,43	francs.
1 *pfennig* (Allemagne). . .	1,2345	centime.
1 *piastre* (Chine).	5,38	francs.
1 — (Empire Ottoman)	22,78	centimes.
1 *picul* (Chine)	60,478	kg.
1 *pint* (Angleterre). . . .	0,5679	litre.
1 — (Etats-Unis). . . .	0,474	litre.
1 *pole* (5,5 yards) (Anglet.)	5,07911	mètres.
1 poncelet	100	kgm : s.
1 —	0,981	kilowatt.
1 poncelet-heure	360 000	kgm.
1 —	0,981	kilowatt-heure.
1 *pound* (Angleterre). . .	453,5927	grammes.
1 — *per foot*.	1 488,19	g : m.
1 — *per horse-power* . .	0,4474	kg par cheval.
1 — *per mile*.	281,85	g : km.
1 — *per square inch* . .	0,0704	kg : cm^2.
1 — *per square foot* . .	48,8	g par dm^2.
1 — *per yard*	0,4961	kg : m.
1 — *per square yard* . .	542,5	g : m^2.
1 *pound per mile*.	15,53	francs par km.
1 — *per yard*	27,34	francs par mètre.
1 — *per square yard* . .	29,9	francs par m^2.
1 — *per cubic yard* . .	32,7	francs par m^3.
1 *pound sterling*.	25,2213	francs.
1 *poundal*	14,0906	grammes (force).
1 —	13 825,3	dynes.
1 *poude* (Russie)	16,38	kilogrammes.
1 pyr	1	bougie décimale.

A	B	C
1 **Quadrant**	1	henry.
1 —	90	degrés.
1 —	10^9	centimètres.
1 *quart* (Angleterre) . . .	1,136	litres.
1 *quarter* (64 gallons). . .	290,78	litres.
1 quintal métrique . . .	100	kilogrammes.
1 **Radian**	57° 14′ 44″	degrés.
1 — par seconde . .	1	unité C. G. S de vitesse angulaire.
1 *rod* (perch carré) . . .	25,2194	m^2.
1 *rood* (1210 yards carrés) .	1 011,6775	m^2.
1 *rouble* (Russie)	4	francs.
1 *roupie* (Indes anglaises) .	2,3757	francs.
1 **Sack** (3 bushels) (Angleterre.	109,043	litres.
1 *sagène* (Russie)	213,356	cm.
1 — *cube*	9,713	m^3.
1 *sen* (Japon).	5,1664	centimes.
1 *shilling* (Angleterre) . .	1,261	francs.
1 — *per 1000 cubic feet.*	4,45	centimes par m^3.
1 — *per ton*.	12,3	centimes par 100 kg.
1 — *per gallon* . . .	27,5	centimes par litre.
1 — *per pound*	2,76	francs par kg.
1 *short ton* (2000 livres) (Angleterre)	907,185	kilogrammes.
1 *square-inch*	6,4514	cm^2.
1 *square-foot*	928,9968	cm^2.
1 *square-yard*	0,8361	m^2.
1 *square-mile*	2,5899	km^2.
1 *statute mile* (1760 yards) .	1 609,31	mètres.
1 *stone* (14 pounds) . . .	6,3503	kg.
1 *stotinki* (Bulgarie) . . .	1	centime.
1 **Thermal unit**	0,252	calorie (kg-d).
1 —	108	kgm.
1 —	772	*foot-pounds*.
1 —	1 048	joules.
1 *thoman* (Perse)	8,83	francs.
1 *ton* (avoirdupois) . . .	1 016,05	kilogrammes.
1 — *per square inch* . . .	157,5	kg : cm^2.
1 tonne-mètre	1 000	kilogrammètres.
1 tour par minute. . . .	0,10466	radian par seconde.
1 — par seconde . . .	6,2832	radian par seconde.
1 **Unit** (British Association)	1	ohm B. A.
1 — (Board of Trade-) .	1	kilowatt-heure.
1 — (British thermal-) .	1 047	joules.
1 unité Siemens	100	cm de mercure.
1 —	0,9407	ohm international.

A	B	C
1 **Vedro** (Russie)	12,2995	litres.
1 *verchoc* (Russie)	4,445	centimètres.
1 *viersta* —	1 066,78	mètres.
1 volt	10^8	unités C. G. S. de force électromotrice.
1 volt-ampère	1	watt.
1 **Watt**	10^7	unités C. G. S. de puissance.
1 watt-seconde.	1	joule.
1 — -heure	3 600	joules.
1 — —	0,86	calorie (kg-d).
1 weber	1	unité C. G. S. de flux magnétique.
1 *werst* (500 sagènes) (Russie)	1 067	mètres.
1 **Yard** (Angleterre) . . .	91,4384	cm.
1 *yen* (Japon).	5,1664	francs.

INSTRUCTIONS POUR LA RÈGLE A CALCUL.

MODÈLE MANNHEIM.

Division de la règle et lecture des nombres. — La règle à calcul, modèle Mannheim, se compose d'une règle dans la coulisse de laquelle glisse une réglette.

Les divisions de la partie supérieure de la règle (c'est-à-dire les divisions placées au-dessus de la réglette) constituent deux échelles identiques et consécutives.

La portion depuis 1 gauche jusqu'à 1 milieu constitue la première échelle (1). Cette portion étant prise pour unité de longueur, on a porté les longueurs 1 — 2, 1 — 3, 1 — 4, etc., proportionnelles aux logarithmes de 2, 3, 4, etc., jusqu'à 10, qui a pour logarithme l'unité.

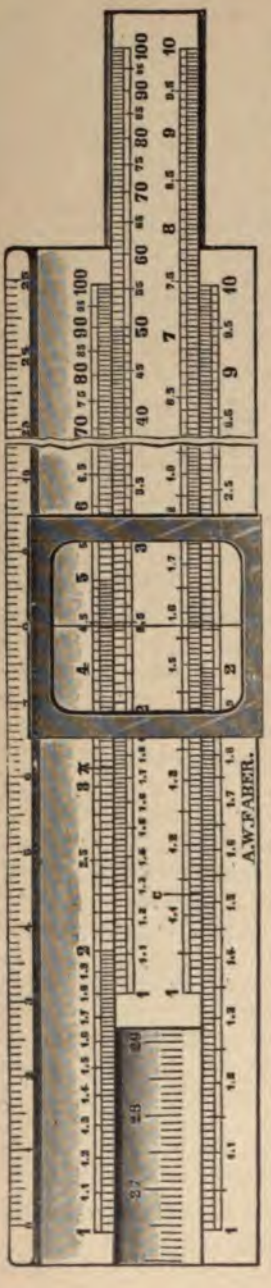
Les longueurs 1 — 2, 2 — 3, etc., sont elles-mêmes divisées par le même procédé, et donnent, par exemple, entre 2 et 3, les logarithmes des nombres tels que 2.1, 2.2, 2,3, etc. On peut continuer de la même manière ; mais on est bientôt arrêté, parce que les traits ainsi obtenus finissent par trop se rapprocher.

On doit imaginer par la pensée l'intervalle compris entre deux traits consécutifs divisé de la même manière que précédemment. On remarquera qu'entre 1,1 et 1,2, 1,2 et 1,3,... 1,9 et 2 on n'a mis que 5 divisions ; chacune d'elles vaut donc deux dixièmes. Dans les calculs avec la règle, on pourra ne jamais s'inquiéter de l'ordre décimal à cause de la propriété des caractéristiques ; cette propriété permet au trait gauche de représenter 1, 10, 100, 1 000, 0,1, 0,01, etc., puisqu'on peut supposer à gauche ou à droite de la règle autant d'unités qu'on voudra.

D'après cela un nombre quelconque peut être lu sur la première échelle. La partie inférieure de la règle contient une seule échelle, double de la première. La réglette contient sur sa face les mêmes échelles que la règle, placées de la même manière.

---

(1) Cette expression, 1re échelle, sera employée exclusivement pour cette échelle avec la distinction 1re échelle de la règle, 1re échelle de la réglette.



Multiplication. — On emploie les deux échelles inférieures de la règle et de la réglette.

Amener l'un des traits 1 de la réglette sur l'un des facteurs lu sur la règle ; lire le produit sur la règle en face de l'autre facteur lu sur la réglette. Si, en employant le trait 1 gauche, le produit ne peut pas être lu sur la règle, employer le trait 1 droite.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le produit a autant de chiffres qu'il y en a dans les deux facteurs ; si l'on a employé le trait 1 gauche, il a un chiffre de moins.

Division. — Le procédé est inverse de celui de la multiplication ; on emploie les mêmes échelles.

Placer le diviseur lu sur la réglette au-dessus du dividende lu sur la règle ; lire le quotient sur la règle au-dessous de l'un des traits 1 de la réglette.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le nombre de chiffres du quotient est égal à la différence entre le nombre de chiffres du dividende et celui du diviseur ; si l'on a employé le trait 1 gauche, il y a un chiffre de plus au quotient.

Proportion. — On emploie les deux échelles supérieures de la règle et de la réglette.

Effectuer d'abord l'opération nécessaire pour trouver le quotient, et, sans en faire la lecture, chercher le produit de ce quotient par le 3me facteur de la proportion.

Formation des carrés et extraction des racines carrées. — Les nombres de l'échelle supérieure de la règle sont les carrés des nombres de l'échelle inférieure.

Pour obtenir un carré ou une racine carrée, il suffit de mettre ces nombres en regard, soit au moyen du curseur, soit au moyen de l'un des traits 1 de la réglette. On devra observer que la valeur du trait 1 gauche de l'échelle supérieure est toujours le carré de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, et, par suite, elle ne peut être que 1, 100, 10 000 ou 0,01, 0,0001, etc.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au carré d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de la racine carrée au cas où il est compris entre 1 et 100.

Formation des cubes. — Pour faire le cube d'un nombre, on renverse la réglette ; on emploie l'échelle inférieure de la règle et ce qui a été appelé première échelle de la réglette.

Mettre en coïncidence les traits indiquant sur chacune de ces échelles le nombre dont on veut avoir le cube ; lire ce dernier sur l'échelle supérieure de la règle en regard du trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur. La valeur du 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle est alors le cube de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, c'est-à-dire qu'elle ne peut être que 0,001, 1, 1 000, etc. ; le trait 1 milieu et le trait 1 droite ont des valeurs respectivement 10 et 100 fois plus grandes.

Pour lire tous les cubes par ce procédé, il faudrait trois échelles à la partie supérieure de la règle. Les nombres qui devraient se lire sur la 3me échelle, se liront sur la 1re (qui la remplace) en regard du trait 1 de la réglette qui est à la gauche du lecteur ; alors il faut attribuer au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle les valeurs 0,1, 100, etc. du trait 1 droite, qui n'est autre chose que le trait 1 gauche de la 3me échelle.

La formation des cubes peut aussi s'effectuer sans renverser la réglette.

Extraction des racines cubiques. — Pour l'extraction de la racine cubique, le procédé est inverse ; la réglette est renversée.

Lire le nombre dont on veut avoir la racine cubique sur l'échelle supérieure de la règle, en attribuant au 1 gauche de cette échelle les valeurs 0.001, 1, 1 000, etc., cubes de 0,1, 1, 10, etc. Mettre en regard de ce nombre le trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur.

Si le nombre devait être lu sur la 3me échelle dont nous avons parlé plus haut, mettre le trait 1 de la réglette qui est à la gauche du lecteur en regard de ce nombre lu sur la 1re échelle. Chercher par tâtonnement le nombre dont les traits réels ou fictifs sur l'échelle inférieure de la règle et sur la 1re échelle de la réglette (qui se trouve ici à la droite du lecteur) sont en regard. Ce nombre est la racine cubique cherchée.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au cube d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de sa racine cubique au cas où il est compris entre 1 et 1 000.

Sinus, Tangentes. — L'échelle S du revers de la réglette est l'échelle des sinus. Les longueurs, comptées à partir de l'extrémité gauche de cette échelle jusqu'à 1, 2, 3, etc., représentent les logarithmes des sinus naturels des angles de 1°, 2°, 3°, etc., mesurés dans une circonférence de rayon 100. Le dernier trait à droite correspond à sin 90°. Le premier trait à droite de l'extrémité gauche de l'échelle correspond à sin 40'.

L'échelle T, échelle des tangentes, est construite de la même manière.

On met l'échelle dont on veut se servir en contact avec l'échelle supérieure de la règle.

Si l'on fait coïncider les extrémités des échelles S ou T avec les extrémités de l'échelle supérieure, on lira en face des traits 1, 2, 3, etc. les sinus ou les tangentes de ces angles.

En attribuant au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle la valeur 0,01 et, par suite, au trait 1 droite la valeur 1, on aura les valeurs de ces lignes trigonométriques dans une circonférence de rayon 1.

On obtiendra la valeur des tangentes des angles plus grands que 45° en divisant 1 par la tangente de l'angle complémentaire.

Ces échelles sont employées, dans les calculs où il entre des lignes trigonométriques, de la même manière que les échelles ordinaires des nombres.

Logarithmes. — Le revers de la réglette contient aussi une échelle divisée en parties égales; elle sert à mesurer les longueurs représentant, sur l'échelle inférieure de la règle, les parties décimales des logarithmes des nombres. La réglette étant dans sa position ordinaire, amener le trait 1 gauche de la réglette sur le nombre dont on veut avoir le logarithme ; lire ce dernier sur l'échelle des parties égales en regard du trait tracé sur le biseau de l'extrémité droite de la règle. Par exemple, pour 2 on trouve 301, qu'il faut lire 0,301.

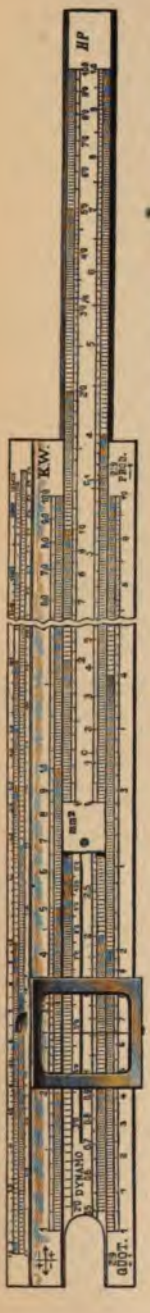
Divisions en millimètres. — L'échelle du biseau sera employée comme double décimètre. L'échelle placée sur la face opposée à celle du biseau est divisée en millimètres ; elle commence à l'extrémité de la règle ; cela est indispensable pour mesurer certaines dimensions.

On mesure les longueurs qui dépassent $0^{m}26$ en allongeant la règle au moyen de la réglette, qu'on sort plus ou moins de sa coulisse. La longueur est lue à l'extrémité gauche de la réglette, dans le fond de la coulisse.

MODÈLE FABER.

La nouvelle règle à calcul de A. W. Faber est destinée spécialement aux ingénieurs électriciens et mécaniciens. Néanmoins, on peut s'en servir également pour toutes les opérations qui s'effectuent avec la règle à calcul précédente. Sa construction ne présente que de légères modifications, qui permettent de faire trois autres genres de calculs très importants. Les divisions métriques sur le biseau et sur le fond intérieur sont remplacées par des échelles spéciales ; la réglette se termine à gauche par une portée métallique taillée en biseau, qui permet de nouvelles lectures.

Échelles logarithmes-logarithmes. — La surface du biseau a été utilisée pour y placer deux échelles superposées, nommées échelles log-log. A pro-



prement parler, ces deux échelles n'en font qu'une, qu'il a été nécessaire de partager en deux parties, à cause de sa grande longueur. L'échelle totale va de 1,1 à 100 000 ; la première partie est graduée de 1,1 à 2,9 et la deuxième, de 2,9 à 100 000. Sur le biseau, le curseur porte un index taillé en biseau, dont le tranchant correspond exactement au trait du verre. A l'aide de cet index, de l'échelle log-log et de la graduation inférieure de la réglette, on peut, dans les limites comprises entre 1,1 et 100 000, faire les opérations de la forme a^x ou $\sqrt[x]{a}$, c'est-à-dire élever à une puissance donnée ou extraire une racine, sans qu'il soit nécessaire que a et x soient des nombres entiers. En choisissant 1,1 comme limite inférieure, on a pris comme base les valeurs qui se présentent le plus fréquemment dans la pratique ; la limite supérieure, 100 000, a été donnée ensuite par la longueur de la règle. Au trait initial de chacune des deux parties de l'échelle et au trait final de la première partie correspondent deux traits de repère marqués 2,9 et placés, l'un avant le trait 1 de la graduation inférieure de la règle, à gauche, et l'autre après le trait 10 de la même graduation, à droite.

Puissances. — 1er exemple : $1{,}124^{2{,}24} = 1{,}2993$.

Amener l'index du curseur sur la division 1,124 de l'échelle log-log, puis le trait 1 de la graduation inférieure de la réglette sous le trait du curseur ; faire glisser ensuite ce dernier jusqu'à ce que son trait de repère soit sur la division 2,24 de la graduation inférieure de la réglette ; le tranchant de l'index du curseur indique alors sur l'échelle log-log la puissance cherchée, qui est 1,2993.

Il ressort de cet exemple qu'il est très simple de déterminer une puissance inférieure à 2,9. Lorsque la puissance est supérieure à 2,9 et se trouve par conséquent dans la deuxième partie de l'échelle log-log, il devient nécessaire de transposer la réglette, comme dans l'exemple suivant.

2me exemple : $1{,}665^{3{,}17} = 5{,}03$.

Amener, comme dans l'exemple précédent, l'index du curseur sur la division 1,665 de l'échelle log-log, puis le trait 1 de la graduation inférieure de la réglette sous le trait du curseur ; dans cette position, l'exposant 3,17 se trouve en dehors de la règle ; pour qu'on puisse amener le trait du curseur sur ce chiffre, il est donc nécessaire de transposer la réglette. Pour cela, remarquer quelle est la division de la graduation inférieure de la réglette qui correspond au trait de repère 2,9 à l'extrémité inférieure droite de la règle ; c'est

ici 2,09. Pousser ensuite la réglette à gauche jusqu'à ce que cette même division, 2,09, corresponde exactement au deuxième trait de repère 2,9 à l'extrémité inférieure gauche de la règle. Cela fait, on peut amener le trait de repère du curseur sur le chiffre 3,17 de la graduation inférieure de la réglette et il ne reste plus qu'à lire la puissance cherchée, soit 5,03, sur la deuxième partie de l'échelle log-log, où elle est indiquée par l'index du curseur, comme dans l'exemple précédent.

Racines. — 3me exemple : $\sqrt[2,8]{26,5} = 3,22$.

Amener l'index du curseur sur la division 26,5 de l'échelle log-log, puis la division 2,8 de la graduation inférieure de la réglette sous le trait du curseur ; faire glisser ensuite celui-ci jusqu'à ce que son trait de repère soit sur le trait 1 de la graduation inférieure de la réglette ; l'index du curseur marque alors sur l'échelle log-log la racine cherchée, qui est 3,22. Lorsque cette racine se trouve dans l'autre partie de l'échelle, il faut transposer la réglette, comme dans l'opération inverse, ainsi que le montre l'exemple suivant.

4me exemple : $\sqrt[7,15]{8,75} = 1,354$.

Amener, comme dans l'exemple précédent, l'index du curseur sur la division 8,75 de l'échelle log-log, puis la division 7,15 de la graduation inférieure de la réglette sous le trait du curseur. Remarquer ensuite quelle est la division de la graduation inférieure de la réglette qui correspond au trait de repère 2,9 de gauche et pousser la réglette à droite jusqu'à ce que cette même division vienne correspondre exactement au trait de repère 2,9 de droite. Cette division est ici 3,509. Amener ensuite le trait du curseur sur le trait 1 de la graduation inférieure de la réglette et lire la racine cherchée sur l'échelle log-log, où elle est indiquée, dans l'autre partie, par l'index du curseur, soit ici 1,354.

Si la racine est inférieure à 1,1, il n'est pas possible de l'extraire à l'aide de la règle à calcul, de même qu'il est impossible de se servir de cette règle pour élever un nombre inférieur à 1,1 à une puissance quelconque, par le procédé ci-dessus.

Échelles au fond de la règle. — Au fond de la règle, la division métrique a été remplacée par deux nouvelles échelles logarithmiques. L'extrémité gauche de la réglette est pourvue d'une garniture métallique biseautée permettant de lire les résultats avec plus de précision, le métal s'usant moins facilement. L'échelle supérieure permet de déterminer, d'un seul coup de réglette, le rendement des dynamos et des moteurs électriques, ou leur puissance, en kilowatts ou en chevaux, lorsqu'on connaît leur rendement.

L'échelle inférieure permet de déterminer, en deux coups de réglette seulement, la chute de tension dans une ligne, connaissant l'intensité du courant, la longueur et la section du fil. Bien entendu, on peut déterminer n'importe lequel de ces facteurs, lorsque les autres sont connus. Ce procédé

ne s'applique toutefois qu'au courant continu et au courant alternatif sans différence de phase.

Pour plus de simplicité, l'échelle supérieure sera appelée l'échelle des rendements et l'échelle inférieure, l'échelle de la chute de tension ou l'échelle des volts.

A droite de la graduation supérieure de la règle se trouve la marque K W (kilowatts) et à droite de la graduation supérieure de la réglette, la marque H P (chevaux). L'échelle des rendements, au fond de la règle, donne, à partir de 100, le rendement des dynamos en allant vers la gauche et celui des moteurs en allant vers la droite.

Rendement des dynamos. — 5me exemple : déterminer le rendement d'une dynamo de 90 kw, qui absorbe 134 chevaux.

Amener la division 13,4 (correspondant à 134 chevaux) de la graduation supérieure de la réglette au-dessous de la division 90 de la graduation supérieure de la règle ; l'extrémité gauche de la réglette indique le rendement cherché, soit ici 90 °/o, sur l'échelle correspondante.

On voit par cet exemple que, pour un rendement donné, on peut déterminer, sans changer la position de la réglette, toutes les puissances imaginables en kw ou en chevaux. Pour cela, il suffit d'amener l'extrémité gauche de la réglette sur la division correspondant au rendement donné ; à toute division de la réglette, lue en chevaux, correspond sur la règle la puissance en kilowatts, et réciproquement.

6me exemple : soit 90 °/o le rendement donné.

Amener l'extrémité gauche de la réglette sur dynamo 90 et lire, par exemple, au-dessus de 20 chevaux, 13,25 kw ; au-dessus de 50 chevaux, 33.1 kw ; au-dessus de 100 chevaux, 66,24 kw, etc.

Rendement des moteurs. — 7me exemple : déterminer le rendement d'un moteur de 20 chevaux, absorbant 17,1 kw.

Amener 2 de la graduation H P au-dessous de 17,1 de la graduation K W et lire à gauche de la réglette le rendement cherché, soit 80 °/o. Comme dans l'exemple précédent, il s'ensuit que, pour tout rendement donné, la puissance absorbée en kw se trouve immédiatement au-dessus de la puissance fournie en chevaux.

Échelle de la chute de tension ou échelle des volts. — L'emploi de cette échelle est aussi simple que celui de la précédente. La chute de tension dans une ligne à courant continu ou à courant alternatif, dans ce dernier cas à la condition seulement que le circuit soit à charge non inductive, se calcule d'après la formule $e = Il/cs$, e étant la chute de tension en volts, I l'intensité en ampères, l la longueur simple de la ligne en m, s la section du fil en mm² et c la constante du cuivre. Pour la graduation de la règle, cette constante a été prise égale à 28,7. L'échelle indique directement la perte en volts, entre 0,5 et 10 volts.

8me exemple : déterminer la chute de tension dans une ligne de 70 mm² de section et de 80 m de longueur, l'intensité étant de 60 ampères.

Amener le trait 1 de la graduation supérieure de la réglette sous la division 6 de la règle, puis le trait du curseur sur la division 8 de la réglette (produit Il), puis faire glisser la réglette de manière à amener la division 7 de la graduation supérieure sous le trait du curseur (quotient Il/s) et lire directement sur l'échelle des volts la chute de tension cherchée, soit ici 2,38 volts.

Ici, la règle a un avantage qui saute immédiatement aux yeux. Si la chute de tension trouvée est trop forte, un simple déplacement de la réglette permet de déterminer immédiatement la section nécessaire pour obtenir la chute de tension voulue. Supposons que celle-ci doive être de 1 volt seulement ; le curseur restant en place, amener la réglette sur la division 1 de l'échelle des volts, et lire sous le trait du curseur, sur la graduation supérieure de la réglette, la section cherchée, qui est ici de 167 mm².

Si l'on amène l'extrémité gauche de la réglette sur la division correspondant à une chute de tension donnée et le trait du curseur sur celle qui correspond à une section déterminée, on peut obtenir, par des déplacements successifs de la réglette, tous les facteurs du produit Il qui sont valables pour la section et la chute de tension admises.

Il est donc très facile, à l'aide de l'échelle des volts, de déterminer n'importe quel facteur de la formule ci-dessus, lorsque les autres sont connus.

La règle porte les constantes usuelles 28,7 et 736 ; au revers, elle porte en outre une série des constantes les plus usitées en électricité et en mécanique.

Table analytique des Matières.

Pages

INTRODUCTION.

Chapitre I.

EXÉCUTION, DISCUSSION ET COMPTES-RENDUS DES ESSAIS. UNITÉS DE MESURE.

Classification des méthodes d'essai 1
Mesures directes. Erreurs systématiques et erreurs fortuites . . . 2
Mesures indirectes. Erreur limite et erreur probable 5
Conditions les plus favorables d'une mesure indirecte 9
Rapport à établir entre les erreurs partielles d'un résultat indirect. 13
Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives. Règles à calcul 17
Interpolation. 19
Préparation d'un essai. Notes d'expérience. Rapports. Représentation graphique des résultats 20
Unités de mesure 23

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Longueur et diamètre des conducteurs cylindriques. Micromètres. Jauge Palmer. Jauge à cadran 32
Mesure des angles. Lecture directe. Lecture par réflexion. Méthode subjective et méthode objective 34
Mesure des forces faibles. Divers modes de suspension des équipages mobiles 41

Pages

Mesure des temps 46

Enregistrement des déviations. Procédé de Richard. Procédé photographique. Méthode de l'auteur. Méthode de Frölich. Méthode de Blondel 47

Mesure des vitesses 50

Essai d'une installation motrice à vapeur 53

Mesure de la puissance mécanique. Indicateur Crosby. Dynamomètre de transmission von Hefner-Altenek. Frein à corde 57

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Grandeurs considérées en photométrie 60

Étalons de lumière 69

Systèmes d'unités pratiques 72

Bases de la photométrie 73

Méthodes photométriques 77

Photomètre Foucault 81

Photomètre Lambert et Rumford 82

Photomètre Villarceau 82

Photomètre Bunsen 82

Photomètre Joly 84

Photomètre Lummer et Brodhun 84

Photomètre Witman 86

Intensité moyenne sphérique. Photomètre Rousseau. 87

Lumenmètres Blondel 94

Photomètre intégrateur Matthews. 95

Courbes d'éclairement 95

Photomètre L. Weber 97

Photomètre Mascart 99

Appareil Houston et Kennely 100

Rendement lumineux des lampes à incandescence. 101

Rendement lumineux des lampes à arc voltaïque 104

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ÉTALONS DE MESURE.

Étalons de résistance 108

Boites de résistances 115

Pages

Rhéostats 122
Résistances élevées 123
Résistances artificielles pour courants intenses 123
Étalons de quantité d'électricité et d'intensité de courant. . . . 125
Étalons de force électromotrice 126
Étalons de capacité. 131
Étalons d'induction 136

Chapitre V.

MATÉRIEL D'UN LABORATOIRE ÉLECTRIQUE.

Locaux. Dispositions générales. Mesures de précision 138
Laboratoire industriel 145
Commutateurs et clefs 148
Soudures 153

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Classification des appareils utilisés à la mesure des courants . 155
Description des galvanomètres à aimant fixe 155
Théorie des galvanomètres à aimant fixe. 163
Shunts 168
Détermination de la constante d'un galvanomètre à l'aide d'un couple étalon 171
Emploi du voltamètre pour le tarage des galvanomètres 173
Étude balistique du galvanomètre à aimant fixe et à champ radial. Mesure d'une décharge instantanée 175
Constante balistique. Son rapport avec la constante permanente. Coefficient de sensibilité d'un galvanomètre 183
Résistance critique 186
Influence de la durée de la décharge 187
Répétition de la décharge pour obtenir une élongation renforcée . 189
Caractéristiques d'un galvanomètre 189

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Galvanomètre des tangentes. 193
Système Wiedemann 196
Système Kelvin 196

Pages

Système Obach. 197
Correction pour la torsion du fil de suspension. 198
Mesure d'une décharge instantanée à l'aide du galvanomètre à aimant mobile 198
Moyens employés pour développer la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile 199
Amortissement du mouvement du système mobile 203
Galvanomètre de torsion Siemens et Halske 205
Galvanomètres cuirassés 207
Galvanomètre Broca 207
Galvanomètre différentiel. Modèle de Lord Kelvin. Réglage et applications. 208
Choix d'un galvanomètre. 212

Chapitre VIII.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Principe 214
Électrodynamomètre de Weber 216
Électrodynamomètres de Fleming et de Bellati 216
Balances électrodynamiques de Lord Kelvin, de Pellat et de Kew 218

Chapitre IX.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ELECTROMAGNÉTIQUES.

Méthodes indirectes. 221
Méthodes directes. Méthode de déviation. 222
Méthode du voltmètre 224
Méthodes de zéro. Méthode d'opposition de Poggendorff. Potentiomètres de Clark, de Crompton et d'Arnoux. Ponts de compensation de Feussner et de Carpentier 225
Variantes de la méthode d'opposition. Emploi des balances électrodynamiques. Méthode de Lacoine . . . . . 23[illegible]

Chapitre X.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ELECTROSTATIQUES.

Méthode indirecte par l'électromètre absolu de Lord Kelvin. . . 23[illegible]
Principe de l'électromètre à quadrants employé pour la mesure directe des potentiels . . . . . 24[illegible]

Pages

Modèles d'électromètres à quadrants de M. Edelmann, de Lord Kelvin, de M. Mascart et de l'auteur 247
Électromètre capillaire de M. Lippmann 250

Chapitre XI.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES.

Généralités 252
Conditions propres aux appareils pour courants alternatifs . . . 255
Ampèremètres à cadre mobile. Système Weston. Système Chauvin et Arnoux 257
Ampèremètres à bobine fixe. Systèmes Deprez et Carpentier, Hummel, Dobrowolski, Evershed. 260
Appareils à dilatation. Système Cardew. Système Hartmann et Braun 264
Appareils électrodynamiques. Modèle Siemens. Modèle Weston . . 269
Appareils à induction électromagnétique. 271
Voltmètres électrostatiques. Modèles de Lord Kelvin, de MM. Ayrton et Mather et de M. Jona. 273
Mesure des courants de grande fréquence et faible intensité . . . 276
Étalonnage des ampèremètres et voltmètres. Courbe des erreurs . 277

Chapitre XII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

Méthodes indirectes. Méthode de Weber. 282
Méthode de MM. Lorenz et Jones. 283
Méthode de la perte de charge 284
Méthode par le voltmètre et l'ampèremètre. 288
Méthodes directes. Méthode de déviation 288
Méthode de M. Rousseau. 291
Ohmmètres 291
Méthodes de zéro. Méthode du galvanomètre différentiel . . . 294
Pont de Wheatstone. Principe de la méthode. Positions du galvanomètre et de la pile. Valeurs les plus favorables à donner aux résistances 299
Pont à bobines. 303
Pont à fil divisé. 306
Calibrage d'un fil. 309
Enregistreur Callendar. 309
Double pont de Lord Kelvin. 310

Pages

Méthode de la Reichsanstalt pour la comparaison des résistances étalons 313
Vérification d'une boîte de résistances 318
Propriétés du pont de Wheatstone pour les courants variables . . 320

Chapitre XIII.

MESURE DES CAPACITÉS.

Méthode indirecte de Jenkin 325
Cas des condensateurs à résidu 326
Méthodes directes. Méthode de comparaison 328
Méthode de Faraday 329
Méthodes de zéro. Méthode de M. de Sauty 330
Méthode de M. Gott 332
Méthode de Lord Kelvin 333

Chapitre XIV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Cas d'un courant continu. Wattmètre 335
Cas des courants périodiques 337
Wattmètres spéciaux. Modèles Siemens et Halske, Kelvin, Sumpner, à induction 347
Méthode de MM. Ayrton et Sumpner 350
Méthode de M. Fleming 352
Wattmètre thermique Chauvin et Arnoux 354
Méthodes électrométriques 356

Chapitre XV.

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et joulemètres 358
Coulombmètre Edison 360
Coulombmètre O'Keenan 362
Coulombmètre de Ferranti 362
Coulombmètre Schallenberger 363
Compteurs oscillants. Système Aron. Système A. E. G. 364
Joulemètres-moteurs. Système E. Thomson. Système Vulcain . . 368
Joulemètres à induction. Systèmes Ferraris, Blathy, Stanley et Westinghouse 371

Pages

Compteurs à intégration discontinue 373
Compteurs à double tarification 374
Limites d'erreurs des compteurs 375
Essais des compteurs 377

Chapitre XVI.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASE.

Emploi des wattmètres 380
Méthode graphique de M. Janet 381
Phasemètre Dobrowolsky. 382
Phasemètre Brüger 384

Chapitre XVII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

Coefficients de self-induction 386
Méthode directe de Maxwell pour la comparaison d'un coefficient de self-induction à celui d'une bobine étalon. Emploi de commutateurs spéciaux, du téléphone et de courants alternatifs 388
Méthodes indirectes. Méthode de Lord Rayleigh pour mesurer un coefficient de self-induction en fonction d'une résistance 392
Méthode industrielle de M. Joubert 394
Comparaison d'une self-induction et d'une capacité. Méthodes de MM. Vaschy et de la Touanne, de M. Sumpner et de M. Kempe . . 395
Méthode de M. Anderson 399
Méthode de Maxwell pour la comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle avec un coefficient de self-induction. 401
Comparaison de deux coefficients d'induction mutuelle 403
Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle et d'une capacité. Méthodes d'élongation et de réduction à zéro de MM. Vaschy et de la Touanne 404

MESURES MAGNÉTIQUES.

Chapitre XVIII.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre. Méthode du magnétomètre de Gauss 408

Pages

Inclinomètre de Weber 412

Détermination de l'intensité du champ dans l'entrefer d'une dynamo. Méthode par induction. Méthode basée sur le phénomène de Hall 415

Chapitre XIX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

Généralités 417

Méthode magnétométrique 420

Méthodes basées sur l'induction électromagnétique. Dispositifs de MM. Rowland, Hopkinson, Ewing et Drysdale 423

Méthodes d'atelier basées sur la force portante. Appareils de M. Thompson et de M. Du Bois 431

Méthodes basées sur la mesure d'un champ magnétique. Dispositifs de M. Brüger et de MM. Kœpsel et Kennely 433

Méthodes de compensation. Perméamètres de M. Ewing et de MM. Picou et Carpentier. 435

Méthode du wattmètre pour la mesure de l'hystérésis 437

Tracé approché de la courbe du magnétisme à l'aide du wattmètre 442

Hystérésimètres 442

APPLICATIONS.

Chapitre XX.

RÉSISTANCE DES GALVANOMÈTRES.

Méthode du pont de Wheatstone 447

Méthode de la déviation réduite 448

Méthode d'égale déviation 450

Méthode de Lord Kelvin 451

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

Méthodes de déviation 453

Méthodes de zéro. Dispositifs de M. Bouty, de M. Kohlrausch, de MM. [illegible] 454

Pages

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Objet de la mesure 458
Cas de deux lignes parallèles 458
Essai des terres d'un paratonnerre 459

Chapitre XXIII.

RÉSISTIVITÉS ET RIGIDITÉS DIÉLECTRIQUES.

Résistivité des conducteurs 461
Résistivité des électrolytes 464
Résistivité des diélectriques 464
Rigidité diélectrique des isolants 467
Rigidité diélectrique des câbles 470

Chapitre XXIV.

ESSAIS GÉNÉRAUX DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Mesure de la résistance d'un câble à l'usine. 473
Résistance d'une canalisation posée 474
Isolement des lignes aériennes 478
Isolement des câbles à la gutta-percha 478
Isolement des joints des câbles. 481
Isolement des câbles industriels 483
Capacité des canalisations. 483
Coefficients d'induction des canalisations. 485

Chapitre XXV.

ESSAIS DES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Essais périodiques. Méthode par courants reçus 487
Dérangements des lignes. 488
Perte en un point d'une ligne 489
Méthode de Blavier 491
Méthode de Kennely. 492
Méthode de la boucle 493
Méthode de la chute de potentiel. 494

Pages

Correction pour l'isolement 495
Communication entre deux lignes voisines. 495
Interruption d'une ligne 496

Chapitre XXVI.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Isolement des réseaux. 497
Mesure de l'isolement des réseaux à courant continu en service. Méthode du voltmètre 499
Méthode de la dérivation. 502
Mesure de l'isolement des réseaux à courants alternatifs en charge 503
Localisation des défauts d'isolement. Méthode de sectionnement. Variantes de la méthode de la boucle. Méthodes de la chute de potentiel et du voltmètre. Méthode de la boussole. Méthode de l'auteur. . 504
Signalisation des pertes à la terre dans les réseaux en service . . 511

Chapitre XXVII.

ESSAIS SPÉCIAUX AUX RÉSEAUX DE TRACTION.

Résistance des lignes de contact 516
Résistance du retour 517
Résistance des joints de rails. 517
Isolement 518
Dérangements 519
Différences de potentiel des rails entr'eux et par rapport aux conduites voisines. 519

Chapitre XXVIII.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Mesure de la force électromotrice 521
Mesure de l'effet utile 522
Mesure de la résistance intérieure. Méthode de la déviation réduite 523
Méthode d'égale déviation. 524
Méthode de M. Mance. 525
Méthodes de M. Kohlrausch et de MM. Ferrié et Carpentier. . . 526
Méthode de M. Uppenborn 526
Méthode du voltmètre 527
Méthode de M. Munro. 528

Pages

Chapitre XXIX.

ACCUMULATEURS.

Essais divers. Méthodes de MM. Boccali et Nernst pour mesurer la résistance intérieure des couples secondaires 530

Chapitre XXX.

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Rendement 536
Échauffement 537
Isolement et rigidité diélectrique 539
Puissance nominale et surcharges 540
Précautions à prendre 541

Chapitre XXXI.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Essais antérieurs à la construction d'une dynamo 542
Essais postérieurs à la construction 545
Mesures de résistance 547
Vérification d'un induit 549
Caractéristiques des machines à courant continu 552
Détermination directe du rendement des dynamos 561
Détermination du rendement de dynamos couplées 565
Détermination du rendement par évaluation des pertes 572
Séparation des pertes par frottements, par hystérésis et par courants de Foucault 581

Chapitre XXXII.

ALTERNATEURS ET MOTEURS SYNCHRONES.

Enregistrement des grandeurs électriques périodiques. Procédés de M. Joubert, de M. Hospitalier, de M. Duddell, de M. Blondel, de MM. Abraham et Carpentier, de M. Braun et de l'auteur 589
Analyse expérimentale des harmoniques des grandeurs électriques périodiques 600
Mesure des fréquences 604
Essais des alternateurs. Caractéristiques 606

Table alphabétique des Matières.

Nos DES PAGES.

A

Abraham et Carpentier. Oscillographe. 505.
Accéléromètre Ohnes. 53.
Accumulateurs. Essais. 530.
Alternateurs et moteurs synchrones. Analyse des harmoniques des courbes périodiques. [illegible] enregistrement des courbes périodiques. [illegible] générales sur les essais. [illegible]; mesure de la fréquence. [illegible] de la [illegible] électrique. [illegible] de l'échauffement. [illegible] de l'isolement. [illegible] du rendement : méthode directe. [illegible] par alternateurs couplés. [illegible] par évaluation des pertes. [illegible] prédétermination de la chute de tension. [illegible] règlements sur les essais de réception. [illegible] tracé des [illegible]
[illegible]
A[illegible]. 2[illegible].

Ampèremètres. 252. 255 : à cadre fixe, 256 : à cadre mobile, 257 : à dilatation, 264 : à induction, 271 : électrodynamiques, 269 : étalonnage, 277.
Anderson. Mesure des coefficients de self-induction. 309.
Angles. Mesure par lecture directe. 34 : par réflexion, 34 : méthode objective de Lord Kelvin, 38 : subjective de Gauss et Poggendorff, 35.
A[illegible]. Table. [illegible]2.
Armagnat. Analyse des harmoniques des courbes périodiques. 604.
A[illegible]. Mesure des fréquences. 606.
Ayrton et Perry. Ampèremètre, 260 : potentiomètre, 233 : voltmètre, 260 : wattmètre thermique, 354.
A[illegible]. Compteurs. 364. 375.
Ayrton. Shunt universel, 171 : *et Mather.* Galvanomètre, 161 : voltmètre électrostatique, 273 : *et Perry.* Etalon d'induction, 13[illegible] : ohmmètre, 292 : secohmmètre, 355 : *et Sumpner.* Mesure de la puissance électrique, 350.

B

Balances électrodynamiques de Kew, 220 : de Lord Kelvin, 218 : de Pellat, 214.
B[illegible]. Fréquencemètre, 604.
Behn-Eschenburg. Prédétermination de la chute de tension des alternateurs, 615.

Bellati. Electrodynamomètre, 216.
Benischke. Détermination des frottements des moteurs asynchrones, 629.
Benoit et de Nerville. Méthode d'emploi du pont de Wheatstone, 306.
Black. Mesure de la résistance des canalisations, 475.
Blakesley. Mesure des différences de phase, 380.
Blathy. Joulemètre, 372.
Blavier. Localisation des terres sur les lignes télégraphiques, 491.
Blondel. Enregistrement des déviations, 50; hystérésimètre, 444; lumenmètres, 94; mesure des coefficients de self-induction, 387; oscillographe, 597; unités photométriques. 72.
Blondlot et Curie. Mesure de la puissance électrique, 357.
Boccali. Mesure de la résistance des accumulateurs, 533.
Bolomètre, 277.
Bougie décimale, 72, 73; *à un mètre*, 73; *par cm²*, 73.
Bougies. Étalons d'intensité lumineuse, 70.
Bouty. Mesure de la résistance des électrolytes, 454.
Boys. Enregistrement photographique, 40.
Brasure, 154.
Braun. Oscillographe, 600; *et Hartmann*. Ampèremètre et voltmètre, 266.
Brillouin. Mesure des coefficients d'induction, 403.
Broca. Galvanomètre, 207.
Brodhun et Lummer. Photomètre, 84.
Brown et Boveri. Signalisation des terres, 512; *et Routin*. Compteur à double tarification, 374.
Brüger. Perméamètre, 433; phasemètre, 384.
Bunsen. Photomètre, 82.

C

Câbles artificiels, 136.
Callendar. Enregistreur, 309.
Calorie, 25.
Canalisations électriques. Essai de la rigidité diélectrique des câbles, 470; mesure de la capacité, 483; de la résistance après la pose, 474; avant la pose, 473; de l'isolement des câbles à la gutta-percha, 478; des câbles industriels, 483; des isolateurs, 467; des joints des câbles, 481; des lignes aériennes, 478; des coefficients d'induction, 485.
Capacité des canalisations, 483; étalons, 131; mesure directe par la méthode de comparaison, 328; de de Sauty, 330; de Faraday, 329; de Gott, 332; de Lord Kelvin, 333; indirecte par la méthode de Jenkin, 325; cas des condensateurs à résidu, 326; *voltaïque* des accumulateurs, 530.
Caractéristiques des alternateurs, 608; des dynamos à courant continu, 552.
Carcel, 69.
Cardew. Voltmètre, 265; *et Fontaine*. Mesure du rendement des dynamos, 567.
Carpentier. Ohmmètre, 292; pont de compensation, 237; *et Abraham*. Oscillographe, 599; *et Deprez*. Ampèremètre et voltmètre, 260; *et Ferrié*. Mesure de la résistance des électrolytes, 457; des piles, 526; *et Picou*. Perméamètre, 436.
Centimètre, 23.
Champ magnétique. Mesure de l'intensité par induction, 415; par l'accroissement de résistance du bismuth, 415; par l'inclinomètre, 412; par le magnétomètre, 408.
Chaperon. Bobines de résistance, 115.
Chaudières. Essais, 54.
Chauvin et Arnoux. Ampèremètre, 260; potentiomètre, 233; voltmètre, 260; wattmètre thermique, 354.
Cheval-vapeur, 25.
Clark. Pile étalon: modèle du Board of Trade, 126; du Reichsanstalt, 128; potentiomètre, 231.
Clefs, 148.
Coefficient de self-induction, 386; des canalisations, 485; étalons, 136; mesure par comparaison avec un coefficient d'induction mutuelle : méthode de Brillouin, 403; de Maxwell, 401; avec une capacité : méthode d'Anderson, 399; de Fleming, 400; de Kempe, 398; de Stroud, 401; de Sumpner, 397; de Vaschy et de la Touanne, 395, 396; avec une résistance : méthode de Joubert, 394; de Ledeboer, 393; de Lord Rayleigh, 392; avec un étalon : méthode de Maxwell, 388.
Coefficient de sensibilité d'un galvanomètre, 186.
Coefficient d'induction mutuelle des canalisations, 485; mesure par comparaison avec un autre coefficient d'induction mutuelle, 403; avec un coefficient de self-induction : méthode de Brillouin, 403; de Maxwell, 401; avec une capacité : méthode de Vaschy et de la Touanne, 404.

Commutateurs, 148.
Commutatrices. Essais, 618, 652.
Compte-secondes, 46; *-tours*, 50.
Compteurs électriques, 358; essais, 377; limites d'erreurs, 375; modèle A. E. G., 368; Aron, 364; Blathy, 372; de Ferranti, 362; Edison, 360; E. Thomson, 368; Ferraris, 371; Frager, 378; O'Keenan, 362; Schallenberger, 363; Stanley, 372; Vulcain, 369; Westinghouse, 373; tarifications spéciales, 374.
Conducteurs électriques industriels. Propriétés, 663.
Constante balistique d'un galvanomètre, 183; *permanente* d'un galvanomètre, 164.
Coulomb, 29.
Coulombmètres, 358; modèle Aron, 364; de Ferranti, 362; Edison, 360; O'Keenan, 362; Schallenberger, 363.
Courants. Etalons, 125; mesure par les ampèremètres, 252; par les galvanomètres à aimant fixe, 155; à aimant mobile, 193; par les réactions électrodynamiques, 214; *de grande fréquence*. Mesure, 276.
Courbes périodiques. Analyse des harmoniques, 600; enregistrement: procédé d'Abraham et Carpentier, 599; de Blondel, 597; de Braun, 600; de Duddel, 596; de Joubert, 589; d'Eric Gerard, 594, 600; d'Hospitalier, 592.
Crompton. Potentiomètre, 232.
Crosby. Indicateur pour machine à vapeur, 57.
Curie et Blondlot. Mesure de la puissance électrique, 357.

D

D'Arsonval et Deprez. Galvanomètre, 156.
Décharge électrique. Mesure, 175, 198.
Décrément logarithmique, 180.
de Ferranti. Coulombmètre, 362.
de la Touanne et Vaschy. Mesure des coefficients d'induction, 395, 396, 404.
de Nerville et Benoit. Méthode d'emploi du pont de Wheatstone, 306.
Déphasage. Voir différence de phase.
Deprez. Frein électromagnétique, 565; *et Carpentier*. Ampèremètre et voltmètre, 260; *et d'Arsonval*. Galvanomètre, 156.
de Sauty. Mesure des capacités, 330.
Dellmar Séparation des pertes intérieures des dynamos, 582.
Devaux-Charbonnel. Mesure de la résistance des canalisations, 476.
Diamètre des conducteurs cylindriques. Mesure, 32.
Diélectriques. Essai de la rigidité, 467; mesure de la résistivité, 464.
Différence de phase. Mesure par la méthode de Blakesley, 380; de Brüger, 384; de Dobrowolski, 382; de Janet, 381; par les wattmètres, 380.
Dispersion magnétique des machines. Mesure, 542.
Dobrowolski. Ampèremètre, 262; phasemètre, 382; voltmètre, 262.
Drysdale. Mesure de la perméabilité et de l'hystérésis, 430.
Du Bois. Balance magnétique, 432; *et Rubens*. Galvanomètres cuirassés, 207.
Duddel. Oscillographe, 596; thermogalvanomètre, 277.
Dynamomètres de transmission, 59.
Dyne, 25.

E

Echauffement des machines électriques. Mesure, 537, 606, 634.
Eclairage, 69; unité, 73.
Eclairement, 67; courbes d'éclairement, 95; unité, 73.
Eclat, 68; unité. 73.
Edelmann. Electromètre, 247.
Edison. Coulombmètre, 360.
Electrodynamomètres. Principe, 214; modèle de Bellati, 216; de Fleming, 216; de Siemens, 270; de Weber, 216; de Weston, 271.
Electrolytes. Mesure de la résistance par les méthodes de déviation, 453; de zéro: dispositif de Bouty, 454; de Ferrié et Carpentier, 457; de Kohlrausch, 456; mesure de la résistivité, 464; valeurs de la résistance, 667.
Electromètre absolu de Lord Kelvin, 239; à quadrants, 240; modèle d'Edelmann, 247; d'Eric Gerard, 247; de Lord Kelvin, 249; de Mascart, 249; capillaire de Lippmann, 250; multicellulaire de Lord Kelvin, 273.
Energie électrique. Mesure, 358.
Enregistrement des déviations. Procédé de Blondel, 50; d'Eric Gerard, 49; de Frölich, 50; de Richard, 48; photographique, 48.
Epstein. Mesure de l'hystérésis, 441.
Erg, 25; *par seconde*, 25.
Erreurs constantes ou systématiques, 2; fortuites ou variables, 3; limites, 5; probables, 5; rapports à établir entre les erreurs partielles d'un résultat, 13.

Essais. Comptes-rendus, 1; discussion, 1; exécution, 1; notes d'expérience, 20; préparation, 20; rapports, 20; représentation graphique des résultats, 20.
Etalons de capacité, 131; de force électromotrice, 126; de lumière, 69; de quantité d'électricité, 125; de résistance, 108; d'induction, 136; d'intensité de courant, 125.
Evershed. Ampèremètre, 262; ohmmètre, 292; voltmètre, 262.
Ewing. Hystérésimètre, 442; mesure de l'hystérésis et de la perméabilité par le magnétomètre, 420; par les effets d'induction, 427, 429; perméamètre, 435.

F

Faber. Règle à calcul, 682.
Facteur de puissance des transformateurs, 643.
Facteur de réduction d'un galvanomètre, 164.
Farad, 29.
Faraday. Mesure des capacités, 329.
Ferraris. Joulemètre, 371.
Ferrié et Carpentier. Mesure de la résistance des électrolytes, 457; des piles, 526.
Feussner. Boîtes de résistances, 119; pont de compensation, 234; résistances étalons, 115.
Fleming. Electrodynamomètre, 216; mesure de la puissance électrique, 352; des coefficients de self-induction, 400.
Flux lumineux, 67; unité, 73.
Fontaine et Cardew. Mesure du rendement des dynamos, 567.
Force électromotrice. Etalons, 126; mesure, 521.
Forces magnétisantes nécessaires pour aimanter les métaux employés dans les dynamos, 670.
Forces mécaniques faibles. Mesure, 41.
Formule de mérite d'un galvanometre, 164.
Foucault. Photomètre, 81.
Frager. Joulemètre, 373.
Freins, 61, 564.
Fréquence. Mesure, 604.
Fréquencemètres de Kempf et Hartmann, 605; de Moller et Bedell, 604.
Frölich. Enregistrement des déviations, 50; localisation des défauts d'isolement d'un réseau, 506.

G

Galvanomètres à aimant fixe : caractéristiques, 189; description, 155; étude balistique, 175; shunts, 168; tarage à l'aide d'un couple étalon, 171; à l'aide du voltamètre, 173; théorie, 163; à aimant mobile, 193; amortissement du système mobile, 203; correction pour la torsion du fil de suspension, 198; emploi pour la mesure d'une décharge, 198; moyens employés pour modifier la sensibilité, 199; cuirassés, 207; de torsion, 205; différentiels, 208; emploi pour la mesure des résistances, 294; choix d'un appareil, 212; mesure de la résistance par la méthode d'égale déviation, 449; de la déviation réduite, 447; de Lord Kelvin, 451; du pont de Wheatstone, 446.
Gauss. Magnétomètre, 408; mesure des angles par la méthode subjective, 35; unité, 30.
Générateurs et moteurs à courant continu. Dérangements, 646; essais antérieurs à la construction, 542; postérieurs à la construction, 545; généralités sur les essais, 536; mesure de la dispersion magnétique, 542; de la résistance, 547; de la rigidité diélectrique, 540; de l'échauffement, 537; de l'isolement, 539; du champ dans l'entrefer, 415; du rendement : méthodes directes, 561; par dynamos couplées, 565; par évaluation des pertes, 572; règlements sur les essais de réception, 652; répartition des potentiels au collecteur, 549; séparation des pertes intérieures, 581; tracé des caractéristiques, 552; vérification des induits, 544, 549.
Gerard (Eric). Electromètre, 247; enregistrement des déviations, 49; galvanomètres, 156, 157, 159, 161; localisation des défauts d'isolement, 508; suspension amortissante, 141; tracé des courbes périodiques, 594, 600.
Glissement des moteurs asynchrones. Mesure, 621.
Gott. Mesure des capacités, 382.
Gouy. Pile étalon, 129.
Gramme, 23, 25.

H

Harms. Condensateur, 132.
Hartmann et Braun. Ampèremètre et voltmètre, 266; *et Kempf*. Fréquencemètre, 605.
Henry, 29.

Hering. Localisation des défauts d'isolement des réseaux, 507.
Hopkinson. Mesure de la perméabilité et de l'hystérésis, 425; du rendement des dynamos, 565.
Hospitalier. Ondographe, 592.
Housman. Séparation des pertes intérieures des dynamos, 584.
Houston et Kennelly. Photomètre, 100.
Hummel. Ampèremètre et voltmètre, 261; séparation des pertes intérieures des dynamos, 582.
Hystérésimètre de Blondel, 444; d'Ewing, 442.
Hystérésis. Généralités, 417; mesure par compensation: perméamètre de Picou et Carpentier, 436; d'Ewing, 435; par la force portante: dispositif de Du Bois, 432; de Thompson, 431; par le magnétomètre, 420; par l'hystérésimètre de Blondel, 444; d'Ewing, 442; par l'évaluation d'un champ magnétique: appareil de Bruger, 433; de Koepsel et Kennelly, 435; par le wattmètre, 437; dispositif d'Epstein, 441; de Richter, 441; par l'induction électromagnétique: méthode de Drysdale, 430; de Rowland, 423; d'Ewing, 427, 424; d'Hopkinson, 425; pertes pour divers fers et aciers, [illegible].

I

[illegible]

J

[illegible]
ment, 481; *des rails*. Mesure de la résistance, 517.
Joly. Photomètre, 84.
Jona. Electromètre, 276.
Jones et Lorenz. Mesure des résistances, 283.
Jouast. Calcul de l'induction magnétique maxima, 438.
Joubert. Mesure des coefficients de self-induction, 394; relevé des courbes périodiques, 589.
Joule, 29.
Joulemètres, 358; à induction: modèle Blathy, 372; Ferraris, 371; Stanley, 372; Westinghouse, 373; à intégration discontinue: modèle Frager, 373; moteurs: modèle E. Thomson, 368; Vulcain, 369; oscillants: modèle A. E. G., 368; Aron, 366, 375; essais, 377; limites d'erreurs, 375.
Julius. Suspension amortissante, 141.

K

Kapp. Chute de tension des transformateurs, 635; mesure de la perte par hystérésis des transformateurs, 643; *et Lord Rayleigh*. Mesure du rendement des dynamos, 568, 575.
Kelvin (Lord). Balances électrodynamiques, 218; électromètre absolu, 280; à quadrants, 249; multicellulaire, 273; galvanomètre différentiel, 208; industriel, 196; mesure de la résistance des galvanomètres, 451; des angles par la méthode objective, 88; des capacités, 333; pont pour la mesure des faibles résistances, 310; wattmètre, 349.
Kempe. Mesure des coefficients de self-induction, 398.
Kempf et Hartmann. Fréquencemètre, 605.
Kennelly. Localisation des terres sur les lignes électriques, 402; *et Houston*. Photomètre, 100; *et Koepsel*. Perméamètre, 435.
Kilogrammètre, 25.
Koepsel et Kennelly. Perméamètre, 435.
Kohlrausch. Mesure de la résistance des électrolytes, 450; des piles, 520.
Krebs. Frein électromagnétique, 565.

L

Laboratoires électriques. Dispositions générales, 136; locaux, 138; matériel, 139.
Lambert. Mesure des potentiels, 237.
Lambert et Rumford. Photomètre, 82.

Lampes à arc voltaïque. Rendement lumineux, 104; *à incandescence.* Rendement lumineux, 101; *étalons*, 69.
Ledebœr. Mesure des coefficients de self-induction, 393.
Leduc. Mesure des champs magnétiques, 415.
Lignes télégraphiques. Communication entre deux lignes, 495; dérangements, 488; essais périodiques par courants reçus, 487; interruption, 496; localisation des pertes à la terre, 489; méthode de Blavier, 491; de Kennely, 492; de la boucle, 493; de la chute de potentiel, 494.
Lippmann. Electromètre capillaire, 250.
Longueurs Mesure, 38.
Lorenz et Jones. Mesure des résistances, 283.
Lumen, 73; *-heure*, 73; *-mètres*, 94.
Lumination, 68.
Lummer et Brodhun. Photomètre, 84.
Lux, 73.

M

Machines à vapeur. Essais, 56.
Magnétomètre, 408.
Mance. Mesure de la résistance des piles, 525.
Mannheim. Règle à calcul, 679.
Mascart. Electromètre, 249; méthode d'emploi du pont de Wheatstone, 306; photomètre, 99.
Mather et Ayrton. Galvanomètre, 161; voltmètre électrostatique, 273.
Matthews. Photomètre, 95.
Maxwell. Mesure des coefficients d'induction, 388, 401; unité, 30.
Meller. Compteur à double tarification, 374.
Merritt et Ryan. Mesure de la perte par hystérésis des transformateurs, 642.
Mesures absolues ou indirectes, 5; classification des méthodes, 1: conditions les plus favorables d'une mesure, 9; directes ou relatives, 2; électriques, 108; géométriques, 32; magnétiques, 408; mécaniques, 32; par comparaison ou de déviation, 1; par réduction à zéro ou de zéro, 1; photométriques, 66.
Mho, 30.
Micromètres, 33.
Moller et Beddel. Fréquencemètre, 604.
Mordey. Séparation des pertes intérieures des dynamos, 581.
Moscicki. Condensateur, 135.
Moteurs à courant continu. Voir Générateurs.
Muirhead. Câble artificiel, 136.
Munro. Mesure de la résistance des piles, 528.

N

Nernst. Mesure de la résistance des accumulateurs, 535.

O

Obach. Galvanomètre, 197.
Ohm, 27, 109.
Ohmmètres, 291; d'Ayrton et Perry, 292; de Carpentier, 292; d'Evershed, 292.
O'Keenan. Coulombmètre, 362.
Ondographe, 592.
Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives, 17.
Oscillographes d'Abraham et Carpentier, 599; de Blondel, 597; de Braun, 600; de Duddel, 596; d'Eric Gerard, 594.
Owens. Accéléromètre, 53.

P

Palmer. Jauge, 33.
Parallelogramme de Wheatstone, 301.
Pasqualini. Frein électromagnétique, 64.
Pellat. Balances électrodynamiques, 219.
Perméabilité. Généralités, 417; mesure par compensation : perméamètre de Picou et Carpentier, 436; d'Ewing, 435; par la force portante : dispositif de Du Bois, 432; de Thompson, 431; par le magnétomètre, 420; par l'évaluation d'un champ magnétique : appareil de Brüger, 433; de Koepsel et Kennely, 435; par l'induction électromagnétique : méthode de Drysdale, 430; de Rowland, 423; d'Ewing, 427, 429; d'Hopkinson, 425.
Perméamètres de Brüger, 433; de Du Bois, 432; de Koepsel et Kennely, 435; de Picou et Carpentier, 436; de Thompson, 431; d'Ewing, 435.
Perry et Ayrton. Etalon d'induction, 137; ohmmètre, 292; secohmètre, 388.
Phasemètres Brüger, 384; Dobrowolski, 382.
Photomètres. Emploi, 77; modèle de Blondel, 94; de Bunsen, 82; de Foucault, 81; de Joly, 84; de Kennely et

Houston, 100; de Lambert et Rumford, 82; de Lummer et Brodhun, 84; de Mascart, 99; de Matthews, 95; de Rousseau, 90; de Villarceau, 82; de Weber, 97; de Whitman, 86.
Photométrie. Bases, 73; étalons, 69; grandeurs, 66; méthodes, 77; unités, 72.
Picou. Signalisation des terres, 511; *et Carpentier*. Perméamètre, 436.
Piles hydro-électriques. Mesure de la force électromotrice, 521; de la résistance : méthode de Boccali, 533; de Ferrié et Carpentier, 526; d'égale déviation, 524; de Kohlrausch, 526; de la déviation réduite, 523; de Mance, 525; de Munro, 528; de Nernst, 534; d'Uppenborn, 526; du voltmètre, 527; de l'effet utile, 522.
Poggendorff. Mesure des angles par la méthode subjective, 35; des potentiels par la méthode d'opposition, 226.
Poncelet, 25.
Pont de Kelvin, 310; *de Kohlrausch*, 456; *de Wheatstone*, 298; à bobines, 303; à fil divisé, 306; propriétés pour les courants variables, 320; *du Reichsanstalt*, 313.
Ponts de compensation, 226; de Carpentier, 237; de Feussner, 234.
Potentiels. Mesure par les balances électrodynamiques, 237; par les méthodes électromagnétiques directes de déviation, 222; de zéro de Lacoine, 237; de Poggendorff, 226; du voltmètre, 224, 252; indirectes, 221; par les méthodes électrostatiques, 239, 273; répartition des potentiels au collecteur des dynamos, 549.
Potentiomètres d'Arnoux et Chauvin, 233; de Clark, 231; de Crompton, 232.
Potier. Mesure de la puissance électrique, 356.
Prony. Frein, 61.
Puissance électrique. Mesure, 335; cas des courants continus, 335; des courants périodiques, 337; des courants polyphasés, 342; emploi des wattmètres, 335, 338, 340, 344, 347, 355; méthode d'Ayrton et Sumpner, 350; de Blondlot et Curie, 357; de Fleming, 352; de Potier, 356; *mécanique*. Mesure, 57.
Pupin. Analyse des harmoniques des courbes périodiques, 601.

Q

Quadrant, 29.
Quantité d'électricité. Etalons, 125; mesure, 175, 198, 358; *de lumière*, 69; unité, 73.

R

Radian, 25.
Radio-activité. Mesure, 132, 466.
Rayleigh (Lord). Mesure des coefficients de self-induction, 392; *et Kapp*. Mesure du rendement des dynamos, 568, 575.
Règles à calcul, 17; instructions pour l'emploi de la règle de Faber, 682; de Mannheim, 679.
Reichsanstalt. Méthode de comparaison des résistances étalons, 313; modèle de pile Clark, 128.
Rendement des accumulateurs, 530; *des lampes électriques*, 101, 104; *des machines électriques*, 536; alternateurs et moteurs synchrones, 615; commutatrices, 618; générateurs et moteurs à courant continu, 561; moteurs asynchrones, 622; transformateurs, 637.
Réseaux électriques. Essais spéciaux aux réseaux de traction, 516; localisation des défauts d'isolement : méthode de Frölich, 506; de la boucle, 504; de la boussole, 508; de la chute de potentiel, 505; d'Eric Gerard, 508, 519; de sectionnement, 504, 519; d'Hering, 507; du voltmètre, 505; mesure de l'isolement des réseaux à courant continu, 497, 518; méthode de la dérivation, 502; du voltmètre, 499; des réseaux à courants alternatifs, 497, 503; signalisation des pertes à la terre, 511.
Résistance électrique. Accroissement de résistance d'un fil de cuivre avec la température, 666; boîtes, 116; critique d'un galvanomètre, 186; des accumulateurs, 533; des câbles, 473; des canalisations, 474; des dynamos, 547; des électrolytes, 453, 667; des fils conducteurs industriels, 663, 664, 666; des galvanomètres, 446; des joints de rails, 517; des lignes de trolley, 516; des piles, 523; des terres, 458; du retour par les rails, 517; étalons, 108; mesure par les méthodes directes de déviation, 288; de l'ohmmètre, 291; de Rousseau, 291; du galvanomètre différentiel, 294; du pont à fil divisé, 306; du pont de Kelvin, 310; du pont de la Reichsanstalt, 313; du pont de Wheatstone, 299; indirectes de la perte de charge, 284; de Lorenz et Jones, 283; de Weber, 282; du voltmètre et de l'am-

pèremètre, 288; rhéostats, 122, 123; vérification des boîtes, 318.
Résistivité des conducteurs industriels, 663, 671; mesure, 461, 464.
Rhéocorde, 122.
Rhéostats, 122, 123.
Richard. Enregistrement des déviations, 48.
Richter. Mesure de l'hystérésis, 441.
Rigidité diélectrique des câbles, 470; des isolants, 467; des machines, 540, 632; valeurs, 470.
Rothert. Prédétermination de la chute de tension des alternateurs, 614.
Rousseau. Mesure des résistances, 291; photomètre, 90.
Roulin. Séparation des pertes intérieures des dynamos, 586; *et Brown*. Compteur à double tarification, 374.
Rowland. Mesure de l'hystérésis et de la perméabilité, 423.
Rubens et Du Bois. Galvanomètres cuirassés, 207.
Rumford et Lambert. Photomètre, 82.
Ryan et Merritt. Mesure de la perte par hystérésis des transformateurs, 642.

S

Sabine. Clef de charge et décharge, 152.
Schallenberger. Coulombmètre, 363.
Secohm, 29.
Secohmètre, 388.
Seconde, 23.
Shunt, 168.
Siemens et Halske. Ampèremètre, 271; électrodynamomètre, 279; galvanomètre à cadre mobile, 162; de torsion, 205; wattmètre, 347.
Sinus. Table, 662.
Société d'électricité A. E. G. Ampèremètre, 272; joulemètre, 368.
Soudures, 153.
Stanley. Joulemètre, 372.
Stroboscopie appliquée à la mesure des fréquences, 605; des vitesses, 53; du glissement, 622.
Stroud. Mesure des coefficients de self-induction, 401.
Sumpner. Mesure des coefficients de self-induction, 307; du rendement des transformateurs, 639; wattmètre, 349; *et Ayrton*. Mesure de la puissance électrique, 350.
Suspensions amortissantes, 141; pour équipages mobiles, 41.
Swinburne. Mesure du rendement des dynamos, 572.

T

Tachymètres, 52.
Tangentes. Table, 662.
Temps. Mesure, 46.
Terres. Localisation, 488, 504, 519; mesure de la résistance, 458; signalisation, 511.
Thompson (Sylv.). Perméamètre, 431.
Thomson (E.). Joulemètre, 368.
Transformateurs statiques. Généralités sur les essais, 536, 632; mesure de l'échauffement, 634; du facteur de puissance, 643; du rendement: méthode directe, 637; d'opposition, 639; indirecte, 637; prédétermination de la chute de tension, 635; rapport de transformation, 633; règlements sur les essais de réception, 652; séparation des pertes intérieures, 641.

U

Unités de mesure. Unités dérivées, 24; électromagnétiques, 25; fondamentales, 23; mécaniques, 25; photométriques, 72; pratiques, 27; tableau de conversion, 672.
Uppenborn. Mesure de la résistance des piles, 526.

V

Vaschy et de la Touanne. Mesure des coefficients d'induction, 395, 396, 404.
Vereinskerze, 70.
Vernon Harcourt. Lampe étalon, 70.
Villarceau. Photomètre, 82.
Violle. Etalon de lumière, 71.
Vitesses. Mesure, 50.
Volt, 28.
Voltamètres à argent, 173; à cuivre, 174.
Voltmètres, 225, 252, 255; à cadre fixe, 260; à cadre mobile, 257; à dilatation, 264; à induction, 271; électrodynamiques, 269; électrostatiques, 273; étalonnage, 277.
Von Hefner-Alteneck. Dynamomètre de transmission, 60; lampe étalon, 70.
Vulcain. Joulemètre, 369.

W

Watt, 29.
Wattmètre. Mesure de la puissance des courants continus, 335; de la puissance des courants périodiques, 337, 342; de l'hystérésis, 437; des déphasages, 380; modèles à induction, 350; électrodynamiques, 335, 347;

électrostatiques, 357; thermiques, 354; tracé de la courbe du magnétisme, 442.
Weber. Electrodynamomètre, 216; inclinomètre, 412; mesure des résistances, 282; photomètre, 97.
Weiss. Système astatique, 201.
Westinghouse. Joulemètre, 373.
Weston. Ampèremètre, 257; électrodynamomètre, 271; pile étalon, 129; voltmètres, 257, 271.
Wheatstone. Pont, 298, 320.
Whitman. Photomètre, 86.
Wiedemann. Galvanomètre, 196.

MAR 1 3 1939